

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА



Н. Д. ТОРОПЦЕВ

**ТРЕХФАЗНЫЙ  
АСИНХРОННЫЙ  
ДВИГАТЕЛЬ  
В СХЕМЕ  
ОДНОФАЗНОГО  
ВКЛЮЧЕНИЯ  
С КОНДЕНСАТОРОМ**



Н. Д. ТОРОПЦЕВ

# ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В СХЕМЕ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ С КОНДЕНСАТОРОМ

Третье издание, дополненное



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1979

ББК 31.261.63

Т 61

УДК 621.313.333.025.3

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. П. Андриевский, Я. М. Большам, А. И. Зевакин, Е. А. Каминский,  
Э. С. Мусаэлян, С. П. Розанов, В. А. Семенов, Ф. И. Смышлягин,  
А. Д. Смирнов, Б. А. Соколов, П. И. Устинов

**Торопцев Н. Д.**

**Т 61** Трехфазный асинхронный двигатель в схеме одно-  
фазного включения с конденсатором. — 3-е изд.,  
доп. — М.: Энергия, 1979. — 80 с., ил. — (Б-ка элект-  
ромонтера. Вып. 487).

15 к.

В книге рассматриваются возможности и особенности применения трехфазного асинхронного двигателя нормального исполнения в качестве конденсаторного. Описаны различные схемы включения. Даны простые соотношения для определения рабочей емкости конденсатора. Изложены требования техники безопасности при обслуживании конденсаторов. Второе издание вышло в 1970 г. Третье издание дополнено материалами по применению полупроводниковых приборов.

Книга рассчитана на электромехаников и электромонтеров, занятых с эксплуатацией асинхронных двигателей.

Т 30312-380 — 72-79. 2302050000  
051(01)-79

ББК.31.261.63

6П2.1.02

**НИКОЛАЙ ДЕМИДОВИЧ ТОРОПЦЕВ**

**Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного  
включения с конденсатором**

Редактор издательства И. П. Березина

Обложка художника Т. Н. Хромовой

Технический редактор Н. М. Пушкарёва

Корректор М. Г. Гулина

ИБ № 993

Сдано в набор 22.02.79

Подписано в печать 05.07.79

Формат 84×103<sup>1/32</sup>

Бумага типографская № 3

Гарн. шрифта литературный

Печать высокая

Усл. печ. л. 4,2

Уч.-изд. л. 4,3

Тираж 40 000 экз.

Заказ 65

Цена 15 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном  
комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли  
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

© Издательство «Энергия», 1979

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи с достижениями в производстве конденсаторов с улучшенными технико-экономическими показателями создаются благоприятные возможности для расширения областей применения конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками. Такой двигатель прост, надежен, работает от двухпроводной сети и имеет высокий коэффициент мощности.

Наилучшее использование мощности конденсаторного двигателя достигается путем надлежащего выбора рабочей емкости, схемы включения и конденсаторов по напряжению.

Настоящее издание книги дополнено разделом, посвященным применению полупроводниковых приборов в устройствах регулирования емкости конденсаторного двигателя. Этот раздел написан совместно с канд. техн. наук, доцентом Г. Н. Алюшиным.

Автор выражает благодарность рецензентам: члену-корреспонденту АН СССР, доктору техн. наук, проф. Г. Н. Петрову и канд. техн. наук, доценту Ф. М. Юфеву — за ценные замечания, сделанные ими при просмотре рукописи.

Все замечания и пожелания автор просит посылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

## 1. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства получили асинхронные двигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором. Они не имеют скользящих контактов, просты по устройству и обслуживанию. Двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде показан на рис. 1.

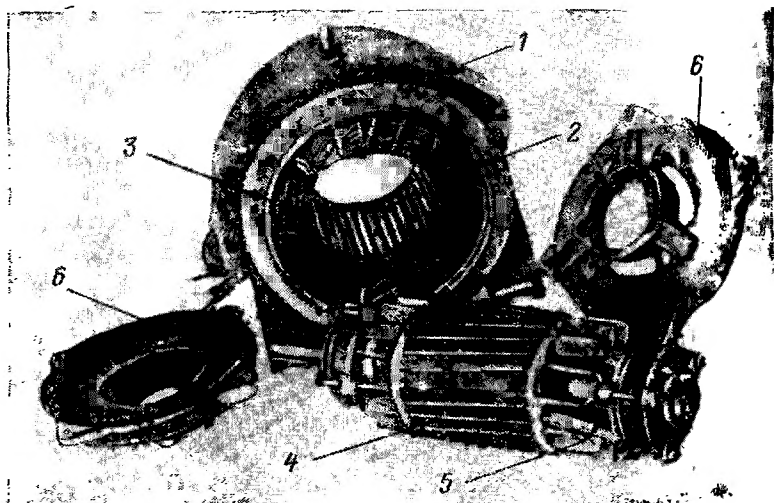


Рис. 1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде.

1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — обмотка статора; 4 — ротор; 5 — вентилятор; 6 — подшипниковые щиты.

Сердечники статора и ротора набирают из листов электротехнической стали. Стержни обмотки ротора замыкаются накоротко, образуя так называемую беличью клетку. Выводы обмотки статора маркируют.

благодаря чему облегчается сборка нужной схемы соединения (звезда или треугольник).

В соответствии с ГОСТ 183-74 приняты следующие обозначения выводов обмоток отдельных фаз: начало и конец первой фазы  $C1$  и  $C4$ , второй  $C2$  и  $C5$  и третьей  $C3$  и  $C6$ . Расположение выводов на щитке двигателя (рис. 2) должно удовлетворять требованию простоты соединения обмоток по любой схеме.

Трехфазный ток, проходя по обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения поля называется синхронной частотой.

Ротор асинхронного двигателя, вращаясь в направлении движения поля, развивает частоту, несколько меньшую, чем синхронная, называемую асинхронной. Отставание ротора характеризуется скольжением  $s$ . Если частоту вращения поля обозначить через  $n_1$ , а частоту вращения ротора через  $n_2$ , то соотношение для скольжения получит вид:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (1)$$

Из этого выражения следует, что скольжение асинхронного двигателя изменяется от единицы (при пуске, когда  $n_2=0$ ) до нуля (при синхронной частоте вращения, т. е. когда  $n_2=n_1$ ). Заметим, что точного равенства частоты вращения поля и ротора в двигательном режиме не достигается. Однако отставание ротора на холостом ходу машины так мало, что им можно пренебречь.

Скольжение может быть выражено в процентах:

$$s^0_0 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100. \quad (2)$$

Значения скольжений при полной нагрузке двигателя обычно составляют 4—6%. Это означает, что ротор, вращаясь в направлении поля, отстает от него на 4—6%.

Развиваемая двигателем мощность в пределах нормальных нагрузок пропорциональна скольжению. Поэтому о нагрузке машины можно судить по скольжению.

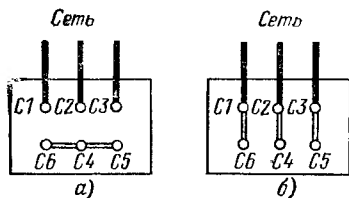


Рис. 2. Расположение выводов на щитке двигателя.

$a$  — при соединении звездой;  $b$  — при соединении треугольником.

Использование мощности двигателя в процессе его эксплуатации может быть различным. Номинальным режимом называется такой режим, при котором двигатель должен нормально работать в течение всего срока службы. Номинальному режиму соответствует номинальное напряжение. Двигатель потребляет при этом номинальный ток, имея номинальные значения частоты вращения, мощности на валу, к. п. д. и коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ).

Назначение двигателя состоит в преобразовании электрической энергии в механическую. В процессе преобразования возникают потери. Они представляют ту часть активной мощности, которая расходуется на нагревание меди обмоток, стали сердечника статора и преодоление сил трения.

Отношение полезной мощности, развиваемой двигателем на валу, к активной мощности, потребляемой им из сети, называется коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3)$$

Кроме активной, двигатель потребляет реактивную намагничивающую мощность, необходимую для образования магнитного потока. Таким образом, полная мощность двигателя  $S$  состоит из активной и реактивной составляющих:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (4)$$

где  $Q$  — реактивная мощность двигателя.

Об относительном значении преобразованной мощности судят по коэффициенту мощности. Чем лучше используется мощность машины, тем выше коэффициент мощности. Для вычисления его достаточно активную мощность  $P_1$  разделить на полную:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{3UI}, \quad (5)$$

где  $U$ ,  $I$  — фазные значения напряжения и тока.

**Пример.** На щите трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором имеются следующие обозначения:  $\Delta / \text{А}$  — 220/380 В, 10,5/6,1 А, 2,8 кВт, 50 Гц, 2880 об/мин, к. п. д. 81,5%,  $\cos \varphi = 0,86$ . Из рассмотрения этих данных заключаем: номинальное напряжение фазы 220 В, номинальный фазный ток 6,1 А, полезная

мощность  $P_2=2,8$  кВт, число пар полюсов  $p=1$ . Так как синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (6)$$

в данном случае равна 3000 об/мин, то скольжение при номинальной нагрузке составит:

$$s_{\text{ном}} = \frac{3000 - 2880}{3000} \cdot 100 = 4\%.$$

Полная мощность двигателя при номинальной нагрузке

$$S_{\text{ном}} = 3U_{\text{ном}}I_{\text{ном}} = 3 \cdot 220 \cdot 6,1 \approx 4000 \text{ В} \cdot \text{А} = 4 \text{ кВт} \cdot \text{А}.$$

Активная мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке,

$$P_{1,\text{ном}} = 3U_{\text{ном}}I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} = 3 \cdot 220 \cdot 6,1 \cdot 0,86 = 3,44 \text{ кВт}.$$

Потери в двигателе при номинальной нагрузке

$$\Sigma \Delta P_{\text{ном}} = P_{1,\text{ном}} - P_2 = 3,44 - 2,8 = 0,64 \text{ кВт}.$$

Повышенные энергетические показатели имеют трехфазные асинхронные двигатели новой единой серии 4А. Двигатели этой серии характеризуются следующей структурой обозначений: 4 — порядковый номер серии; А — наименование вида двигателя — асинхронный; А — станина и щиты из алюминия; Х — станина из алюминия и чугунные щиты; 56...355 — высота оси вращения; S, L, M — установочные размеры по длине корпуса; А, В — обозначение длины сердечника (первая длина А, вторая — В); 2, 4, 6, 8, 10, 12 — число полюсов; У — климатическое исполнение двигателей; 3 — категория размещения. Например: 4АА56А2У3 — электродвигатель серии 4, асинхронный закрытого исполнения, станина и подшипниковые щиты из алюминия, с высотой оси вращения 56 мм, сердечник первой длины, двухполюсный, для районов умеренного климата, 3-й категории размещения [13].

Основные технические данные двигателей небольшой мощности приведены в табл. 1.

С использованием данных табл. 1 построены кривые зависимости коэффициента мощности двигателей от их номинальной мощности. Одна кривая соответствует синхронной частоте вращения 3000 об/мин, другая — 1500 об/мин и третья — 1000 об/мин (рис. 3). Из рассмотрения рис. 3 вытекает, что коэффициент мощности

Таблица I

| Тип двигателя             | Номинальная<br>мощность, кВт | Синхронная<br>частота<br>вращения | К. п. д. | cos φ |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------|-------|
| 4A50A2Y3                  | 0,09                         | 3000                              | 0,6      | 0,7   |
| 4A50B2Y3                  | 0,12                         | 3000                              | 0,63     | 0,7   |
| 4AA56A2Y3                 | 0,18                         | 3000                              | 0,66     | 0,76  |
| 4AA56B2Y3                 | 0,25                         | 3000                              | 0,68     | 0,77  |
| 4AA63A2Y3                 | 0,37                         | 3000                              | 0,7      | 0,86  |
| 4AA63B2Y3                 | 0,56                         | 3000                              | 0,73     | 0,86  |
| 4A71A2Y3 }<br>4AX71A2Y3 } | 0,75                         | 3000                              | 0,77     | 0,87  |
| 4A71B2Y3 }<br>4AX71B2Y3 } | 1,1                          | 3000                              | 0,775    | 0,87  |
| 4A80A2Y3 }<br>4AX80A2Y3 } | 1,5                          | 3000                              | 0,81     | 0,85  |
| 4A80B2Y3 }<br>4AX80B2Y3 } | 2,2                          | 3000                              | 0,83     | 0,87  |
| 4A90L2Y3 }<br>4AX90L2Y3 } | 3                            | 3000                              | 0,845    | 0,88  |
| 4A50A4Y3                  | 0,06                         | 1500                              | 0,5      | 0,6   |
| 4A50B4Y3                  | 0,09                         | 1500                              | 0,55     | 0,6   |
| 4AA56A4Y3                 | 0,12                         | 1500                              | 0,63     | 0,66  |
| 4AA56B4Y3                 | 0,18                         | 1500                              | 0,64     | 0,64  |
| 4AA63A4Y3                 | 0,25                         | 1500                              | 0,68     | 0,65  |
| 4AA63B4Y3                 | 0,37                         | 1500                              | 0,68     | 0,69  |
| 4A71A4Y3 }<br>4AX71A4Y3 } | 0,55                         | 1500                              | 0,705    | 0,70  |
| 4A71B4Y3 }<br>4AX71A4Y3 } | 0,75                         | 1500                              | 0,72     | 0,73  |
| 4A80A4Y3 }<br>4AX80A4Y3 } | 1,1                          | 1500                              | 0,75     | 0,81  |
| 4A80B4Y3 }<br>4AX80B4Y3 } | 1,5                          | 1500                              | 0,77     | 0,83  |
| 4A90L4Y3 }<br>4AX90L4Y3 } | 2,2                          | 1500                              | 0,80     | 0,83  |
| 4A100S4Y3                 | 3                            | 1500                              | 0,82     | 0,83  |
| 4AA63A6Y3                 | 0,18                         | 1000                              | 0,56     | 0,62  |
| 4AA63B6Y3                 | 0,25                         | 1000                              | 0,59     | 0,62  |
| 4A71A6Y3 }<br>4AX71A6Y3 } | 0,37                         | 1000                              | 0,645    | 0,69  |
| 4A71B6Y3 }<br>4AX71B6Y3 } | 0,55                         | 1000                              | 0,675    | 0,71  |
| 4A80A6Y3 }<br>4AX80A6Y3 } | 0,75                         | 1000                              | 0,69     | 0,74  |
| 4A80B6Y3 }<br>4AX80B6Y3 } | 1,1                          | 1000                              | 0,74     | 0,74  |
| 4A90L6Y3                  | 1,5                          | 1000                              | 0,75     | 0,74  |
| 4AX90L6Y3                 |                              |                                   |          |       |
| 4A100L6Y3                 | 2,2                          | 1000                              | 0,81     | 0,74  |
| 4A112MA6Y3                | 3                            | 1000                              | 0,81     | 0,76  |

асинхронного двигателя зависит от номинальной мощности и синхронной частоты вращения.

С увеличением мощности при постоянстве синхронной частоты вращения ( $n_1 = \text{const}$ ) уменьшается относительная величина воздушного зазора. Благодаря этому относительная реактивная намагничивающая мощность также уменьшается, а коэффициент мощности возрастает. К такому же результату приводит увеличение синхронной частоты вращения при постоянстве номи-

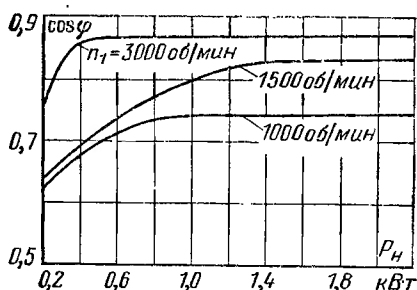


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициента мощности от номинальной мощности асинхронных двигателей при различных значениях синхронной частоты вращения.

нальной мощности двигателя. Скоростные машины имеют меньшие габариты, что обусловлено уменьшением вращающего момента, у них существенно уменьшается объем воздушного пространства между сердечниками статора и ротора.

Кривые зависимости удельной намагничивающей мощности двигателей от номинальной при условии  $n_1 = \text{const}$  показаны на рис. 4. Как видно из рис. 4, удельная намагничивающая мощность тем меньше, чем больше номинальная мощность двигателя и выше синхронная частота вращения.

Переход от зависимостей, приведенных на рис. 3, к зависимостям рис. 4 производится с использованием следующих соотношений:

$$P_{1, \text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}; \quad (7)$$

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{1, \text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}}}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{ном}}}, \quad (9)$$

где  $S_{\text{ном}}$ ,  $Q_{\text{ном}}$  — полная и реактивная мощности двигателя при номинальной нагрузке.

Из сопоставления рис. 3 и 4 нетрудно сделать заключение о влиянии коэффициента мощности на энергетические показатели двигателей и питающей их системы. С увеличением  $\cos \varphi$  происходит уменьшение удельной намагничивающей мощности. При этом полная мощ-

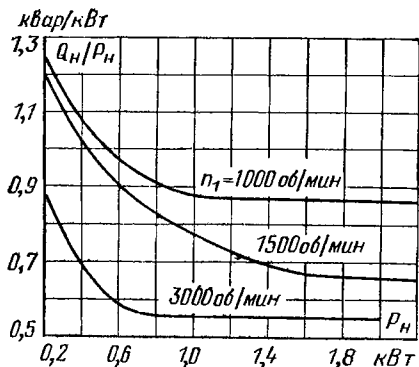


Рис. 4. Кривые зависимости удельной намагничивающей мощности от номинальной мощности асинхронных двигателей при различных значениях синхронной частоты вращения.

ность  $S$  также уменьшается. Таким образом, при одном и том же значении полезной мощности ток двигателя ограничивается. В результате потери внутри машины, обусловленные прохождением по ее обмоткам тока, и падение напряжения в проводах уменьшаются.

## 2. РАБОТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ТРЕМЯ СТАТОРНЫМИ ОБМОТКАМИ ОТ СЕТИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА. СПОСОБЫ ПУСКА

Асинхронный двигатель нормального исполнения может создавать вращающий момент без принятия специальных мер при питании от сети однофазного тока.

Предположим, что цепь одного из проводов работающего двигателя, присоединенного к трехфазной сети, разомкнулась (например, вследствие перегорания плавкой вставки предохранителя). Машина, оказавшаяся

в однофазном режиме либо с последовательным, либо с последовательно-параллельным соединением обмоток статора (рис. 5), будет продолжать вращаться, преодолевая момент сопротивления нагрузки. В первом случае одна фаза полностью теряет питание, во втором происходит уменьшение напряжения на каждой из двух фаз, соединенных последовательно. Частота вращения двигателя при этом снижается, а скольжение увеличивается.

Увеличение скольжения при неизменной нагрузке на валу сопровождается значительным возрастанием тока. Для предупреждения чрезмерного перегрева обмоток необходимо снизить нагрузку двигателя до 50—60% номинальной. Остановив однофазный двигатель, легко убедиться в том, что пустить его в ход непосредственно включением в сеть невозможно. Вращающий момент при пуске оказывается равным нулю. Это обусловлено характером магнитного поля статора, которое в однофазном двигателе является пульсирующим.

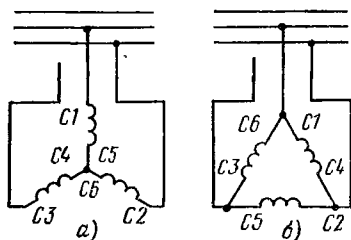


Рис. 5. Однофазное включение асинхронного двигателя.

а — при соединении звездой; б — при соединении треугольником.

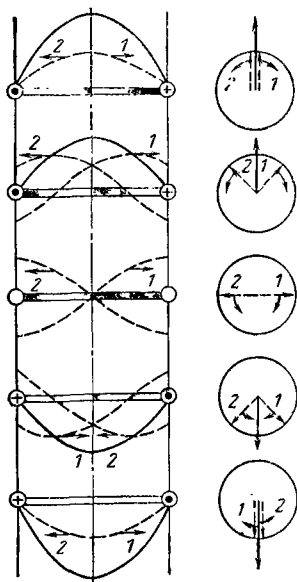


Рис. 6. Разложение пульсирующего магнитного поля на два вращающихся (1 и 2).

Пульсирующее поле может быть представлено в виде двух полей, вращающихся с одной и той же синхронной частотой в противоположные стороны. Наибольшее значение (амплитуда) каждого из них равно половине амплитуды пульсирующего поля.

Разложение пульсирующего поля и его изменение во времени иллюстрируются простым графическим построением, приведенным на рис. 6.

При построении принято допущение, что катушка, по которой проходит ток (показанная в виде одного витка), создаст в воздушном зазоре машины синусоидально распределенное магнитное поле (сплошная линия).

Каждое из вращающихся полей (пунктирные линии 1 и 2) наводит в обмотке ротора э. д. с., под влиянием которых возникают токи. Взаимодействие вращающихся полей с токами ротора приводит к образованию вращающихся моментов, направленных в противоположные стороны. Неподвижный ротор по отношению к этим полям находится в одинаковых условиях, поэтому вращающиеся моменты полностью уравниваются друг друга, чем и объясняется то обстоятельство, что однофазный двигатель не может «взять с места».

Для двигателя с вращающимся ротором равенство моментов не сохраняется, поэтому при отключении одной из фаз двигатель продолжает вращаться.

Прямое поле, т. е. поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, наводит в его обмотке токи небольшой частоты (2—3 Гц при частоте напряжения сети 50 Гц). Обозначим момент, обусловленный прямым полем, через  $M_1$ . Встречному (обратному) полю соответствует тормозной момент  $M_2$ . Токи, индуцированные в обмотке ротора встречным полем, при малых значениях скольжения имеют повышенную частоту (около 100 Гц) и, становясь поэтому почти чисто реактивными, оказывают размагничивающее действие. Ослабление встречного поля вызывает уменьшение тормозного момента  $M_2$ .

При вращении ротора ось результирующего поля однофазного двигателя вращается в направлении прямого поля.

В соответствии с равенством (6) синхронную частоту вращения можно представить в виде

$$n_1 = \frac{60}{T_p}, \quad (6a)$$

где  $T$  — период изменения переменного тока, с.

За время одного периода при  $p=1$  поле сделает один оборот, при  $p=2$  — пол-оборота и т. д. Однако

мгновенные значения частоты вращения образующегося в зазоре машины эллиптического поля не остаются постоянными, что обусловлено его характером.

Результирующий момент однофазного двигателя равен разности моментов от прямого и обратного полей:

$$M=M_1-M_2. \quad (10)$$

Наличие тормозного момента приводит к ухудшению характеристик двигателя. Однофазный двигатель по сравнению с исходным трехфазным имеет меньшие к. п. д. и коэффициент мощности.

Уменьшение к. п. д. связано с возрастанием потерь, обусловленных появлением обратного поля. Снижение коэффициента мощности объясняется увеличением намагничивающего тока.

Существенным недостатком однофазного двигателя является отсутствие пускового момента. Двигатели малой мощности (например, асинхронный двигатель проигрывателя) можно пустить в ход «от руки», но этот способ неприменим для более мощных приводов. Поэтому задача непосредственного пуска однофазного двигателя от сети имеет важное значение. Одно из возможных ее решений рассматривается в настоящей книге. Идея его состоит в образовании в воздушном зазоре машины вращающегося магнитного поля — эллиптического или кругового.

В эллиптическом поле, кроме вращающего момента  $M_1$ , возникает тормозной момент  $M_2$ . В круговом поле тормозной момент отсутствует.

Для получения кругового вращающегося поля должны быть соблюдены определенные условия. При двух статорных обмотках магнитное поле становится круговым, если их магнитодвижущие силы (м. д. с.), равные по величине, сдвинуты в пространстве и во времени на  $90^\circ$  (электрических). Заметим, что под м. д. с. понимают произведение тока обмотки на число ее витков (эффективных).

Ось м. д. с. всегда совпадает с осью обмотки.

Рассмотрим схему включения трехфазного двигателя в однофазную сеть (рис. 7,а). Одна обмотка статора образована фазой  $C1-C4$ , другая состоит из двух последовательно соединенных фаз:  $C2-C5$ ,  $C3-C6$ . Назовем первую обмотку *пусковой*, а вторую *рабочей*, или *главной*. Стрелками 1, 2 и 3 (рис. 7,б) для некоторого

момента времени условно показаны направления и значения пульсирующих м. д. с. отдельных фаз исходного трехфазного двигателя. Ось м. д. с. главной обмотки (стрелка 4) находят по правилу параллелограмма (рис. 7, в). Как видно, ось м. д. с. главной фазы оказывается сдвинутой относительно осей м. д. с. статорных обмоток  $C2-C5$ ,  $C3-C6$  на  $30^\circ$ . При этом между осями м. д. с. главной и пусковой обмоток создается пространственный сдвиг, равный  $90^\circ$ . При соединении обмоток

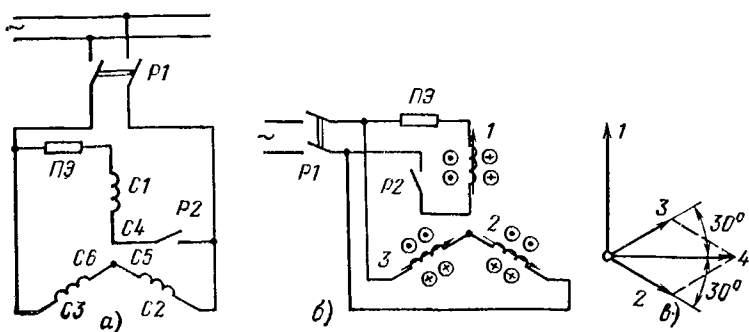


Рис. 7. Образование пространственного угла сдвига между осями главной и пусковой обмоток однофазного двигателя.

двигателя треугольником получается тот же результат.

Для получения сдвига м. д. с., создаваемых токами обмоток, во времени в цепь пусковой обмотки включают активное сопротивление, индуктивную катушку или конденсатор. В первом и втором случаях создается эллиптическое вращающееся поле, так как сдвиг во времени между токами обмоток получается значительно меньше  $1/4$  периода. К достоинству этих способов пуска относятся простота и относительно невысокая стоимость пусковых элементов.

Если в качестве фазосдвигающего элемента использовать конденсатор, то можно получить вращающееся магнитное поле, близкое к круговому, а в некоторых случаях и круговое.

Пуск двигателя в ход производится следующим образом. При замкнутом рубильнике  $P_2$  (рис. 7, а) включается рубильник  $P_1$ . По достижении частоты вращения, близкой к синхронной, цепь пусковой обмотки с пусковым элементом  $ПЭ$  размыкается вручную или автома-

тически, например, посредством центробежного выключателя. Под напряжением сети на время работы остается только главная фаза.

Сравнение различных способов пуска показало, что пусковой ток для одного и того же значения момента получается наименьшим при пуске посредством включения конденсатора. С уменьшением пускового тока уменьшаются колебания напряжения в линии, что приводит к улучшению условий пуска вследствие известной пропорциональности между вращающим моментом асинхронного двигателя и квадратом приложенного напряжения.

Для одинаковых пусковых токов начальный вращающий момент двигателя с конденсатором в цепи пусковой обмотки значительно превосходит момент, получаемый при включении активного сопротивления или индуктивности.

### 3. КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Выше указывалось, что пусковые характеристики однофазного двигателя становятся наиболее благоприятными, когда в качестве пускового элемента используется конденсатор. Для улучшения *рабочих* характеристик конденсатор определенной емкости оставляют включенным на весь рабочий период.

Асинхронный двигатель, работающий от сети однофазного тока, с конденсатором в его цепи называется *конденсаторным*.

По теории и расчету конденсаторного двигателя опубликовано значительное число работ в отечественной и иностранной литературе.

Еще в 1934 г. один из видных советских ученых — академик В. С. Кулебакин, рассмотрев основные свойства конденсаторного двигателя, указал на широкие возможности его применения в народном хозяйстве и, в частности, выдвинул идею его использования в электрической тяге.

Данные теоретических и экспериментальных исследований конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками и специального исполнения нашли отражение в работах М. Крондля (1934 г.), В. Шуйского (1935 г.), И. М. Эдельмана (1936 г.), Г. Б. Меркина (1937 и 1966 гг.), Н. М. Булаева (1937 г.), В. Е. Розенфельда, М. И. Крайцберга, Б. Н. Тихменева (1949 г.),

Х. Клауснитцера (1950 г.), О. А. Некрасова (1952 г.), А. Г. Мирера (1953 г.), Ю. С. Чечета (1949, 1950, 1955 гг.), Ф. М. Юферова (1969, 1971, 1972 гг.) и др.

Фундаментальные исследования вопросов теории и особенностей различных схем конденсаторного двигателя принадлежат А. И. Адаменко (1958, 1960, 1962, 1966, 1969 гг.).

Внимание исследователей продолжают занимать вопросы дальнейшего развития методики проектирования и расчета конденсаторных двигателей специального исполнения. Вместе с тем большой интерес вызывает изучение возможностей улучшения эксплуатационных свойств асинхронного двигателя трехфазного тока, работающего в схеме однофазного включения с конденсатором. Сказанное в значительной мере объясняется расширением областей применения конденсаторного двигателя. Каковы же его характерные особенности?

По сравнению со схемой однофазного включения, показанной на рис. 5, конденсаторный двигатель развивает большую полезную мощность. Ее значение достигает 65—85% номинальной мощности, указанной на щитке. Конденсаторный двигатель как асинхронный короткозамкнутый очень прост по устройству и надежен в работе. Его питание осуществляется от двухпроводной сети.

Ценным свойством конденсаторного двигателя является высокий коэффициент мощности, который может приобретать значения, практически равные или равные единице. В последнем случае двигатель потребляет из сети ток, пропорциональный только активной мощности, так как источником реактивной мощности для него является конденсатор.

Пусковая и рабочая емкости при данном напряжении сети и принятой схеме включения зависят от мощности двигателя. С увеличением мощности они возрастают. Начиная с некоторой мощности, применение конденсаторных двигателей экономически уже не оправдывается из-за относительно высокой стоимости конденсаторов. Предельной мощностью конденсаторного двигателя общего назначения следует признать номинальную мощность 1,7 кВт, обозначенную на щитке\*.

\* Конденсаторные двигатели специального исполнения (например, электротяговые двигатели рудничных электровозов) могут иметь значительно большую мощность. В книге такие двигатели не рассматриваются.

Поясним сказанное на примере двигателя серии А в защищенном исполнении с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Стоимость конденсаторов типа КБГ-МН, образующих рабочую емкость, при мощности двигателя 1 кВт примерно равна стоимости двигателя, т. е. составляет приблизительно 100%. Для мощностей 1,7 и 10 кВт соответственно получаем 140 и 270% стоимости двигателей.

Мощность от нескольких сотен ватт до 1,7 кВт имеет огромное число асинхронных трехфазных двигателей, применяемых в народном хозяйстве. В связи с освоением отечественными заводами технологии изготовления

Таблица 2

| Механизм                                          | Электродвигатель |               |                          |
|---------------------------------------------------|------------------|---------------|--------------------------|
|                                                   | Тип              | Мощность, кВт | Частота вращения, об/мин |
| Машина для очистки кормов от металлических частиц | АОЛ21-4          | 0,27          | 1400                     |
| Вентилятор для помещений животноводческих ферм    | АОЛ31-4          | 0,6           | 1410                     |
| Корнеклубномойка МП-2,2                           | АОЛ31-4          | 0,6           | 1410                     |
| Корнерезка РКР-2                                  | АО32-4           | 1             | 1410                     |
| Ковшовой транспортер ТК-0                         | АО41-4           | 1,7           | 1420                     |
| Жмыходробилка ДЖ-0,5                              | АОЛ31-4          | 1             | 1410                     |
| Вертикальный смеситель кормов                     | А41-6            | 1             | 930                      |
| Маслоизготовитель МИ-50 и сепаратор „Урал“        | АЗ1-4            | 0,6           | 1410                     |
| Сепаратор „Звезда-М“                              | АЗ1-4            | 0,6           | 1410                     |
| Сепаратор „Волга“                                 | АЗ1-4            | 0,6           | 1410                     |
| Машина для стрижки овец                           | —                | 0,125         | 2800                     |

высококачественных конденсаторов становится реальной возможность широкого использования конденсаторных двигателей, особенно в условиях сельскохозяйственного производства, где мощность многих машин животноводческих ферм не превышает 1 кВт. Последнее иллюстрируется данными табл. 2.

Конденсаторный двигатель может также найти применение в промышленности и в быту для привода механизмов и машин небольшой мощности.

Отличительным элементом конденсаторного двигателя является конденсатор. Технические данные конденсаторов, пригодных для использования в цепи конденсаторного двигателя, приведены в § 4.

## 4. КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы применяются в самых различных областях электротехники. В технике сильных токов их используют преимущественно для улучшения коэффициента мощности. Они необходимы также для пуска и работы конденсаторных двигателей.

Электрические свойства конденсаторов в значительной мере зависят от рода *диэлектрика*, заключенного между обкладками. По этому признаку различают воздушные конденсаторы, бумажные, слюдяные, масляные, электролитические и т. д.

Каждый конденсатор рассчитан на вполне определенное *рабочее (номинальное) напряжение*. Рабочим называется напряжение, при котором конденсатор может работать длительно. Номинальное напряжение и емкость указываются в паспортных данных конденсатора.

**Конденсатор типа КБГ-МН** предназначен для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от  $-60$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  и выполняется постоянной емкости. Тип конденсатора КБГ-МН обозначает конденсатор бумажный герметический в металлическом прямоугольном корпусе нормальный.

**Пример.** Конденсатор типа КБГ-МН, 2 В, 1000 В,  $4\text{ мкФ} \pm 10\%$ , т. е. конденсатор бумажный с двумя изолированными выводами (2 В) на номинальное напряжение постоянного тока 1000 В емкостью 4 мкФ с допусковым отклонением  $\pm 10\%$ .

Бумажные конденсаторы выдерживают в течение 4 ч удвоенное рабочее напряжение, в течение 10 с — утроенное рабочее напряжение.

По допускаемому отклонению емкости от номинальной конденсаторы выпускаются трех классов точности:

|                                                     |         |          |          |
|-----------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| Класс точности . . . . .                            | I       | II       | III      |
| Допускаемое отклонение от номинального, % . . . . . | $\pm 5$ | $\pm 10$ | $\pm 20$ |

Основные технические данные конденсаторов приведены в табл. 3.

При работе конденсаторов в цепях переменного тока величина допустимого напряжения не должна превышать значений, указанных в табл. 4.

**Пример.** Допустимое напряжение конденсаторов типов КБГ-МН и БГТ (см. ниже) 6 мкФ, 600 В, используемых в сети переменного тока 50 Гц, составляет не 600, а 250 В.

Таблица 3

| Рабочее напряжение постоянного тока, В | Номинальная емкость, мкФ | Размеры корпуса (длина × ширина × высота), мм | Рабочее напряжение постоянного тока, В | Номинальная емкость, мкФ | Размеры корпуса (длина × ширина × высота), мм |
|----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| 400                                    | 1                        | 49×29×60                                      | 600                                    | 4                        | 69×39×100                                     |
| 400                                    | 2                        | 49×34×80                                      | 600                                    | 6                        | 69×64×110                                     |
| 400                                    | 4                        | 69×39×95                                      | 1000                                   | 1                        | 49×34×80                                      |
| 400                                    | 6                        | 69×39×110                                     | 1000                                   | 2                        | 69×39×95                                      |
| 400                                    | 8                        | 69×64×110                                     | 1000                                   | 4                        | 69×64×110                                     |
| 600                                    | 1                        | 49×34×60                                      | 1500                                   | 1                        | 49×34×110                                     |
| 600                                    | 2                        | 49×34×110                                     | 1500                                   | 2                        | 69×64×100                                     |

Конденсаторы типа БГТ (бумажные герметические термостойкие) предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от  $-60$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  и выполняются постоянной емкости. Конденсаторы типа БГТ по отклонению емкости от номинальной изготавливаются трех классов точности, как и конденсаторы типа КБГ-МН.

В табл. 5 приведены основные технические данные конденсаторов.

Таблица 4

| Номинальное напряжение постоянного тока, В | Допустимое напряжение переменного тока для частоты, Гц |      |      |      | Номинальное напряжение постоянного тока, В | Допустимое напряжение переменного тока для частоты, Гц |      |      |      |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------|------|------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                            | 50                                                     |      | 500  |      |                                            | 50                                                     |      | 500  |      |
|                                            | Емкость конденсатора, мкФ                              |      |      |      |                                            | Емкость конденсатора, мкФ                              |      |      |      |
|                                            | До 2                                                   | 4—10 | До 2 | 4—10 |                                            | До 2                                                   | 4—10 | До 2 | 4—10 |
| 400                                        | 250                                                    | 200  | 125  | 75   | 1000                                       | 400                                                    | 350  | 200  | 150  |
| 600                                        | 300                                                    | 250  | 150  | 100  | 1500                                       | 500                                                    | —    | 250  | —    |

Конденсаторы типа МБГЧ предназначены для работы в цепях переменного или пульсирующего тока в интервале температур от  $-60$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  и выполняются постоянной емкости в корпусах прямоугольной формы. Конденсаторы МБГЧ — металлобумажные (из металлизированной бумаги) герметизированные частотные. По отклонению емкости от номинальной они изготавливаются II и III классов точности.

Основные технические данные конденсаторов приведены в табл. 6.

Таблица 5

| Рабочее напряжение постоянного тока, В | Номинальная емкость, мкФ | Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм | Рабочее напряжение постоянного тока, В | Номинальная емкость, мкФ | Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм |
|----------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| 400                                    | 1                        | 45×30×54                                  | 600                                    | 2                        | 65×30×115                                 |
| 400                                    | 2                        | 45×60×54                                  | 600                                    | 4                        | 65×50×115                                 |
| 400                                    | 4                        | 65×35×115                                 | 600                                    | 6                        | 65×70×115                                 |
| 400                                    | 6                        | 65×50×115                                 | 1000                                   | 1                        | 45×80×54                                  |
| 400                                    | 8                        | 65×70×115                                 | 1000                                   | 2                        | 65×45×115                                 |
| 600                                    | 1                        | 45×45×54                                  | 1000                                   | 4                        | 65×80×115                                 |

Конденсаторы типа ЭП (электролитические пусковые) предназначены для работы в цепях переменного тока в интервале температур от  $-40$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  и выполняются постоянной емкости на номинальные рабочие напряжения 175 и 300 В по III классу точности. Конденсаторы допускают до 30 включений в 1 ч продолжительностью включения до 3 с.

Таблица 6

| Рабочее напряжение переменного тока, В | Номинальная емкость, мкФ | Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм | Рабочее напряжение переменного тока, В | Номинальная емкость, мкФ | Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм |
|----------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| 250                                    | 1                        | 31×31×25                                  | 500                                    | 2                        | 46×51×50                                  |
| 250                                    | 2                        | 46×16×50                                  | 500                                    | 4                        | 69×34×115                                 |
| 250                                    | 4                        | 46×31×50                                  | 750                                    | 1                        | 46×56×50                                  |
| 250                                    | 10                       | 46×61×50                                  | 750                                    | 2                        | 69×39×115                                 |
| 500                                    | 1                        | 46×31×50                                  |                                        |                          |                                           |

Номинальные значения емкости при напряжении 175 В составляют 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 и 100 мкФ, а при напряжении 300 В — 1,5, 3, 5, 8, 10, 15, 20 и 30 мкФ.

## 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Принципиальные электрические схемы конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками показаны на рис. 8.

Как и в случае трехфазного включения, обмотки статора могут быть соединены в звезду (рис. 8,а) или

в треугольник (рис. 8,б). Напряжение сети подводится к двум выводам двигателя, соответствующим началам двух фаз. Между одним из них и выводом, соответствующим началу третьей фазы, включаются конденсатор 1 и конденсатор 2. Последний необходим для увеличения пускового момента.

Пусковая емкость

$$C_{\text{п}} = C_{\text{р}} + C_{\text{о}}, \quad (11)$$

где  $C_{\text{р}}$  — рабочая емкость;  $C_{\text{о}}$  — отключаемая емкость.

После пуска двигателя конденсатор 2 отключается и в схеме остается только конденсатор 1 с рабочей емкостью.

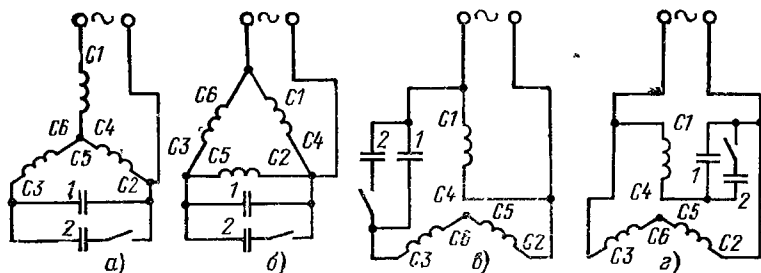


Рис. 8. Принципиальные электрические схемы конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками.

1 — рабочий конденсатор; 2 — отключаемый конденсатор.

Выводы обмоток, к которым подведено напряжение сети, назовем входными. Очевидно, что возможны три комбинации образования входных выводов:  $C1-C2$ ,  $C1-C3$ ,  $C3-C2$ . Положим, что использована первая из них (рис. 8). Тогда переключение на вторую комбинацию ( $C1-C3$ ) приведет к изменению направления вращения (реверсированию).

Как показывает анализ, в схемах включения на рис. 8,а и б, устанавливается определенный порядок следования токов статорных обмоток двигателя, а именно  $I_A-I_B-I_C$ . Этому порядку соответствует также вполне определенное направление вращения поля. Если произвести отмеченное переключение, то токи статорных обмоток будут следовать в обратном порядке ( $I_A-I_C-I_B$ ). Направление вращения поля изменится при этом на противоположное. Порядок следования токов фаз нетрудно определить графическим путем — с по-

мощью векторных диаграмм, которые будут рассмотрены ниже.

В других вариантах схем включения (рис. 8,в и г) из трех фаз исходного трехфазного двигателя образованы две обмотки. Одну из них составляют две фазы, соединенные последовательно. Обмотку, в цепи которой находится конденсатор, условимся называть *конденсаторной фазой*, другую обмотку, включаемую на напряжение сети, — *главной фазой*.

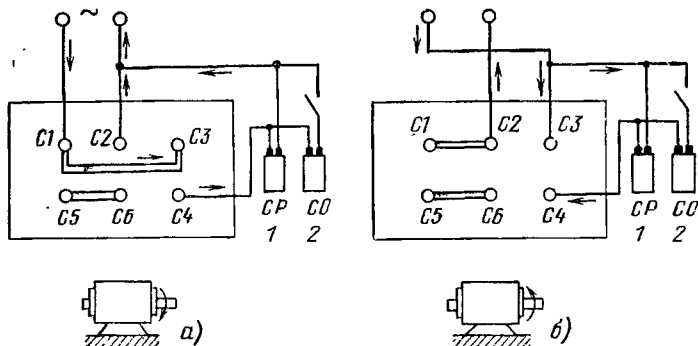


Рис. 9. Соединение выводов на щитке конденсаторного двигателя для схемы включения, показанной на рис. 8,г.

Соединение выводов на щитке применительно к схеме включения, приведенной на рис. 8,г, для одного направления вращения показано на рис. 9,а и для другого — на рис. 9,б. Реверсирование двигателя достигается изменением порядка следования токов главной и конденсаторной фаз. В данном случае с этой целью производится переключение конденсаторной фазы (рис. 9).

В схеме включения конденсаторного двигателя используется следующая аппаратура управления и защиты: двухполюсный и однополюсный рубильники, реле и предохранители. Через двухполюсный рубильник к двигателю подводится питание от сети. Для включения и отключения пускового конденсатора применяются однополюсный рубильник, центробежное реле или специальное реле, токовая обмотка которого включается в цепь главной фазы. Предохранитель защищает двигатель от к. з.

В схеме конденсаторного двигателя, так же как и при трехфазном включении, можно использовать маг-

нитный пускатель. В этом случае легко осуществляются дистанционное управление, защита от самозапуска (при сильном снижении напряжения сети двигатель отключается и самопроизвольно включиться не может), а также защита от перегрузки с помощью тепловых реле магнитного пускателя.

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ И ПУСКОВОЙ ЕМКОСТИ

Номинальными напряжением и током конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками условимся называть *фазные* значения этих величин, указанные в паспорте машины. Например, на щите асинхронного двигателя трехфазного тока типа АОЛ32-4 обозначено: 1 кВт, 127/220 В, 7,3/4,2 А, 1410 об/мин, к. п. д. 78,5%,  $\cos \varphi = 0,79$ . В зависимости от напряжения сети обмотки статора при трехфазном включении соединяются в треугольник (при напряжении 127 В) либо в звезду (при напряжении 220 В). Соответственно ток двигателя при полезной мощности, равной 1 кВт, составляет 7,3 А (соединение треугольником) или 4,2 А (соединение звездой). Однако независимо от схемы соединения фазными значениями напряжения и тока в приведенном примере остаются 127 В и 4,2 А. Их мы и будем считать номинальными при использовании двигателя в качестве конденсаторного.

Емкость и реактивное сопротивление конденсатора находятся в обратной зависимости. Чем меньше емкость, тем больше сопротивление. Изменение емкости сопровождается изменением тока. Из этого следует, что ток конденсаторной фазы (рис. 8, в и г) может оказаться меньше или больше номинального. В первом случае мощность двигателя недоиспользуется, во втором — возникает опасность недопустимого перегрева обмоток и повышения напряжений на отдельных участках схемы (на конденсаторной фазе, на конденсаторе). Особенно неблагоприятным оказывается явление резонанса напряжений, при котором ток конденсаторной фазы во много раз превышает номинальное значение, а возникающие перенапряжения представляют опасность для персонала и, кроме того, могут вызвать пробой изоляции обмотки или конденсатора.

В практике эксплуатации конденсаторного двигателя правильный выбор рабочей емкости имеет поэтому весьма большое значение.

Рабочая (постоянно включенная) емкость выбрана правильно, если фазные токи и напряжения при нагрузке становятся практически номинальными. Развиваемая полезная мощность при этом является номинальной мощностью двигателя. Удовлетворяющую отмеченным условиям рабочую емкость будем обозначать через  $C_{p, \text{ном}}$ . Определение рабочей емкости для любой произвольной нагрузки рассматривается в § 13.

Следует заметить, что полная симметрия напряжений и токов конденсаторного двигателя не достигается, особенно для схем на рис. 8,а и б. Тем не менее любой схеме включения соответствует одна вполне определенная емкость, при которой токи в обмотках нагруженного двигателя несущественно отличаются от номинальных.

Рабочая емкость пропорциональна мощности двигателя (номинальному току) и обратно пропорциональна напряжению. Применительно к рассмотренным схемам включения конденсаторного двигателя для частоты 50 Гц приближенная емкость может быть подсчитана по следующим соотношениям:

для схемы, показанной на рис. 8,а,

$$C_{p, \text{ном}} \approx 2800 \frac{I_{\text{ном}}}{U}; \quad (12)$$

для схемы, показанной на рис. 8,б,

$$C_{p, \text{ном}} \approx 4800 \frac{I_{\text{ном}}}{U}; \quad (13)$$

для схемы, показанной на рис. 8,в,

$$C_{p, \text{ном}} \approx 1600 \frac{I_{\text{ном}}}{U}; \quad (14)$$

для схемы, показанной на рис. 8,г,

$$C_{p, \text{ном}} \approx 2740 \frac{I_{\text{ном}}}{U}, \quad (15)$$

где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток, А;  $U$  — напряжение сети, В.

Таким образом, исходными данными, по которым определяется рабочая емкость  $C_{p, \text{ном}}$ , являются номинальный ток двигателя и напряжение сети.

**Пример.** Определить рабочую емкость для двигателя типа ТС-1А, 0,25 кВт, 127/220 В, 2/1,15 А, если двигатель включен по схеме, приведенной на рис. 8,а, а напряжение сети 220 В. Как

видно, номинальный ток конденсаторного двигателя равен  $1,15$  А. На основании (12) находим:

$$C_{p, \text{ном}} \approx 2800 \frac{I_{\text{ном}}}{U} = 2800 \frac{1,15}{220} \approx 14,6 \text{ мкФ.}$$

Принимаем  $C_{p, \text{ном}} = 15 \text{ мкФ.}$

При определении пусковой емкости исходят прежде всего из требований создания необходимого пускового момента.

Если по конкретным условиям работы электропривода пуск двигателя происходит без нагрузки, то отключаемой емкости не требуется и тогда рабочая емкость в соответствии с (11) будет в то же время пусковой. В этом случае схема включения упрощается.

Пуск под нагрузкой совершается при наличии в цепи двигателя и рабочей, и отключаемой емкостей. Увеличение отключаемой емкости приводит к возрастанию пускового момента, и при некотором определенном ее значении момент достигает своего наибольшего значения. Дальнейшее увеличение емкости приводит к обратному результату: пусковой момент начинает уменьшаться.

Наибольший пусковой момент зависит не только от емкости, но и от схемы включения двигателя. При соединении обмоток звездой (рис. 8,а) или треугольником (рис. 8,б) пусковой момент не превосходит номинальный момент при трехфазном включении. Для других схем (рис. 8,в и г) наибольший пусковой момент может в несколько раз превышать значение номинального момента, но его реализация сопряжена с появлением значительных перенапряжений в цепи конденсаторной фазы. Однако на практике не возникает необходимости в создании такого большого момента при пуске.

Исходя из условия получения пускового момента, близкого к номинальному (при трехфазном включении), необходимо иметь пусковую емкость, примерное значение которой равно:

$$C_{\text{п}} \approx (2,5 \div 3) C_{p, \text{ном}}. \quad (16)$$

Отключаемые конденсаторы работают непродолжительное время (всего несколько секунд за весь период включения или доли секунды). Это позволяет исполь-

зовать при пуске наиболее дешевые электролитические конденсаторы типа ЭП, специально предназначенные для этой цели.

## 7. НАПРЯЖЕНИЕ НА КОНДЕНСАТОРЕ

В § 6 было рассмотрено определение рабочей и пусковой емкостей для различных схем включения конденсаторного двигателя. Не менее важным является выбор конденсаторов по напряжению. Действительно, установка конденсаторов с «запасом» по напряжению, т. е. с превышением номинального напряжения переменного тока над тем, под которым они находятся в схеме, приводит к недоиспользованию их реактивной мощности. Кроме того, стоимость конденсаторов с повышением номинального напряжения увеличивается. С другой стороны, эксплуатация конденсаторов под напряжением, превышающим номинальное, приводит к преждевременному выходу их из строя.

Мы будем сравнивать напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке с напряжением сети.

Для первых двух схем включения конденсаторного двигателя (рис. 8,а и б) без существенной погрешности может быть принято равенство

$$U_{\text{к,ном}} \approx U, \quad (17)$$

где  $U_{\text{к,ном}}$  — напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке (действующее значение);  $U$  — напряжение сети.

Связь между напряжениями при включении двигателя по схеме, приведенной на рис. 8,г, выражается зависимостью

$$U_{\text{к,ном}} \approx 1,15U. \quad (18)$$

Из последнего выражения видно, что в данном случае напряжение на конденсаторе на 15% выше напряжения сети.

Превышение напряжения конденсатора над напряжением сети для схемы, приведенной на рис. 8,в, оказывается еще большим:

$$U_{\text{к,ном}} \approx 2U. \quad (19)$$

Напряжение на конденсаторе, как будет показано ниже, при постоянной рабочей емкости и данном напряжении сети не остается неизменным. Увеличиваясь с уменьшением нагрузки, оно достигает наибольшего

значения при холостом ходе, составляя  $(1,2—1,25)U_{к,ном}$ .

При работе двигателя с недогрузкой рекомендуется пользоваться соответственно следующими соотношениями:

$$U_{к,р} \approx 1,15U; \quad (20)$$

$$U_{к,р} \approx 1,3U; \quad (21)$$

$$U_{к,р} \approx 2,2U; \quad (22)$$

где  $U_{к,р}$  — расчетное напряжение конденсатора.

Конденсатор выбран правильно, если его номинальное напряжение переменного тока равно расчетному или несколько больше его.

**Пример.** Двигатель типа АОЛ32-4, 127/220 В, 1 кВт, включен по схеме, приведенной на рис. 8,г. Напряжение сети 220 В, рабочая емкость 52 мкФ состоит из конденсаторов типа КБГ-М11 по 2 мкФ в каждом.

Требуется определить рабочее напряжение конденсаторов.

Расчетное напряжение  $U_{к,р}$  вычисляем по (21):

$$U_{к,р} \approx 1,3U = 1,3 \cdot 220 = 286 \text{ В.}$$

По табл. 4 для конденсаторов до 2 мкФ при частоте 50 Гц находим, что допустимому напряжению переменного тока 300 В (ближайшее большее к 286 В) соответствует номинальное напряжение постоянного тока 600 В. Итак, выбираем конденсаторы с рабочим напряжением 600 В.

Рабочую емкость комплектуем из 26 конденсаторов по 2 мкФ каждый.

## 8. ВЫБОР СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ

Выбор схемы включения конденсаторного двигателя производится с учетом напряжения сети и данных двигателя по напряжению.

Схема выбрана правильно, если любая из обмоток исходного трехфазного двигателя при номинальной нагрузке оказывается под напряжением, равным номинальному или близкому к нему. При этом имеется в виду, что установленная рабочая емкость определена по соотношению, соответствующему схеме.

Кроме согласования данных по напряжению, оцениваются особенности возможных схем. Заметим, что в отдельных конкретных случаях выбор вариантов схем может быть ограничен. В качестве примера возьмем двигатель электрорубанка типа И24-А, 0,62 кВт, 220 В, 1,88 А, обмотки которого соединены в звезду, причем нулевая точка недоступна. Очевидно, что как конденса-

торный он может иметь только одну схему включения, изображенную на рис. 8,а. Источником питания для двигателя служит сеть однофазного тока напряжением 220 В.

Электрорубанок с конденсаторным двигателем показан на рис. 10.

Рассмотрим теперь особенности конденсаторного двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 8,а. Назовем обмотку  $C1—C4$  главной фазой, через которую

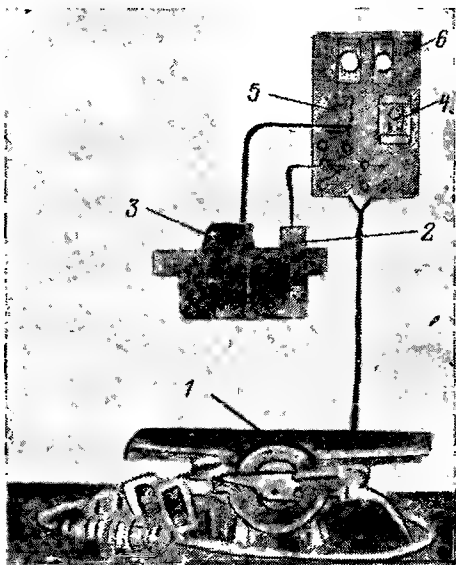


Рис. 10. Электрорубанок с конденсаторным двигателем.

1 — двигатель типа И24-А; 2 — рабочий конденсатор емкостью 24 мкФ; 3 — отключаемый конденсатор емкостью 50 мкФ; 4 — кнопочный выключатель; 5 — однопольсный рубильник в цепи отключаемого конденсатора; 6 — плавкие предохранители.

проходит весь ток двигателя. Обмотку  $C3—C6$ , соединенную последовательно с конденсатором, назовем конденсаторной фазой и третью обмотку  $C2—C5$  — вспомогательной фазой.

Изменение токов этих фаз с изменением скольжения оказывается совершенно различным. Если ток главной фазы с уменьшением нагрузки (скольжения) уменьшается, то ток конденсаторной фазы, наоборот, возра-

стает, достигая наибольшего значения при холостом ходе.

Вспомогательная фаза при холостом ходе и незначительной нагрузке находится в генераторном режиме—ее активная мощность отрицательна. С возрастанием нагрузки вспомогательная фаза переходит в двигательный режим. При этом ее ток, уменьшаясь, достигает некоторого минимального значения и затем начинает увеличиваться.

Активная мощность по фазам распределяется неравномерно. При номинальной нагрузке главная фаза развивает примерно такую же мощность, как конденсаторная и вспомогательная, вместе взятые. Равенства токов всех фаз номинальному не достигается. Поэтому под номинальной здесь имеется в виду такая нагрузка, при которой токи двух фаз равны номинальному, а ток третьей фазы составляет 70—85% номинального. Это определение относится и к случаю соединения обмоток статора треугольником.

Характерными особенностями схемы являются относительно небольшие значения пускового момента и напряжения на конденсаторе.

В другой схеме включения (рис. 8,б) обмотки двигателя соединены в треугольник. По аналогии с предыдущей схемой здесь также можно различить главную, конденсаторную и вспомогательную фазы. Вспомогательной назовем фазу  $C1-C4$ , к которой подведено напряжение сети. Обмотка  $C2-C5$  с параллельно присоединенным конденсатором представляет собой конденсаторную фазу и третья обмотка  $C3-C6$  — главную фазу.

Характер изменения токов в фазах с изменением нагрузки остается таким же, как и при соединении статорных обмоток в звезду.

**Пример.** В § 6 для двигателя ТС-1А, соединенного в звезду, при напряжении сети 220 В получена рабочая емкость  $C_{р, ном} \approx 14,6$  мкФ. Напряжение на конденсаторе в соответствии с (17) равно  $U_{к, ном} \approx U = 220$  В.

При напряжении сети 127 В обмотки двигателя соединяются в треугольник по схеме, приведенной на рис. 8,б. Для нее в соответствии с (13)

$$C_{р, ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{1,15}{127} = 43,5 \text{ мкФ.}$$

Сравнивая емкости 43,5 и 14,6 мкФ, видим, что для схемы, приведенной на рис. 8,б, рабочая емкость увеличивается в 3 раза.

Напряжение на конденсаторе определяется по (17):

$$U_{\text{к, ном}} \approx U = 127 \text{ В.}$$

Активная мощность между обмотками распределяется неравномерно. Наибольшую мощность при номинальной нагрузке развивают главная и вспомогательная фазы.

Относительно небольшой пусковой момент составляет одно из характерных свойств этой схемы. Особенности ее по сравнению с предыдущей состоят в том, что для одного и того же двигателя напряжение на конденсаторе уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, а емкость рабочего конденсатора увеличивается в 3 раза.

Проведенное сравнение показывает, что первая схема (рис. 8,а) является предпочтительнее, так как ее технические и экономические показатели лучше (меньше емкость и габариты батареи конденсаторов, ниже стоимость ее установки). Однако ее применение не всегда оказывается возможным. Если напряжение сети равно номинальному напряжению фазы, обмотки двигателя соединяются в треугольник (рис. 8,б) или как показано на рис. 8,в.

Три фазы двигателя в схемах, представленных на рис. 8,в и г, образуют две обмотки. Одну из них условимся называть главной фазой, другую — конденсаторной.

Ток главной фазы возрастает с нагрузкой, конденсаторной — уменьшается. Двигатель работает с нормальной (номинальной) нагрузкой, когда по обеим обмоткам проходит номинальный ток. При этом встречно-вращающееся магнитное поле становится несущественным, вследствие чего использование мощности двигателя ухудшается.

Активные мощности главной и конденсаторной фаз, соответствующие номинальной нагрузке, примерно одинаковы. С уменьшением нагрузки происходит некоторое возрастание мощности конденсаторной фазы. Мощность главной фазы довольно резко уменьшается и на холостом ходу приобретает отрицательное значение: главная фаза переходит в режим асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, работающего параллельно с сетью. С появлением нагрузки на валу главная фаза переходит в двигательный режим.

Достоинствами схем, приведенных на рис. 8,в и г, по сравнению с рассмотренными выше являются возмож-

ность получения значительного пускового момента и лучшее использование мощности двигателя. Сравним эти схемы.

Пусть питающая сеть однофазного тока, как это часто встречается на практике, имеет напряжение 220 В. Очевидно, что если двигатель выполнен на напряжения 220/380 В, он включается по схеме, приведенной на рис. 8,в или г, если номинальные напряжения двигателя 127/220 В.

Напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке составит: для схемы, приведенной на рис. 8,в,  $U_{к,ном} \approx 2U = 2 \cdot 220 = 440$  В, для схемы на рис. 8,г  $U_{к,ном} \approx 1,15U = 1,15 \cdot 220 = 253$  В.

Между напряжениями на конденсаторе в том и другом случае имеется существенная разница. Повышение напряжения связано с некоторым увеличением стоимости конденсаторов и уменьшением безопасности обслуживания. Кроме того, вследствие возрастания индуктивного сопротивления конденсаторной фазы при включении двигателя по схеме, приведенной на рис. 8,в, возникает опасность перенапряжений, особенно при пуске двигателя.

Схема, приведенная на рис. 8,г, выгодно отличаясь от предыдущей, заслуживает предпочтения. Она является наиболее рациональной схемой включения конденсаторного двигателя. Ниже этот вывод будет обоснован с помощью векторных диаграмм токов и напряжений.

Заметим, что двигатель на напряжение 127/220 В также может быть включен по схеме, приведенной на рис. 8,в, но на напряжение сети 127 В. Если же номинальные напряжения двигателя равны 220/380 В, а напряжение питающей сети равно 220 В, то здесь вместо схемы включения конденсаторного двигателя с двумя обмотками (рис. 8,в) следует выбрать схему с соединением фаз в треугольник (рис. 8,б), несмотря на увеличение емкости конденсаторов.

**Пример.** Имеются конденсаторы типов МБГЧ и ЭП. Двигатель 1 кВт, 220/380 В, с номинальным током фазы 2,4 А включается на напряжение сети 220 В. Требуется определить значение рабочей и пусковой емкостей, а также расчетное напряжение на конденсаторах и напряжение при номинальной нагрузке.

*Схема, приведенная на рис. 8,б.*

Рабочая емкость по (13)

$$C_{р, ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{2,4}{220} = 52,5 \text{ мкФ.}$$

Номинальное напряжение на конденсаторе по (17)

$$U_{к, ном} \approx U = 220 \text{ В.}$$

Расчетное напряжение конденсатора по (20)

$$U_{к, р} \approx 1,15U = 1,15 \cdot 220 \approx 250 \text{ В.}$$

По табл. 6 выбираем 13 конденсаторов МБГЧ емкостью по 4 мкФ с рабочим напряжением 250 В.

Отключаемую емкость принимаем по (16) равной

$$C_o \approx 2C_{р, ном} = 105 \text{ мкФ}$$

и выбираем для нее пять конденсаторов типа ЭП по 20 мкФ на 300 В.

*Схема, приведенная на рис. 8,в.*

Рабочая емкость по (14)

$$C_{р, ном} \approx 1600 \frac{I_{ном}}{U} = 1600 \frac{2,4}{220} \approx 18 \text{ мкФ. } ]$$

Номинальное напряжение на конденсаторе по (19)

$$U_{к, ном} \approx 2U = 2 \cdot 220 = 440 \text{ В.}$$

Оно может быть найдено также умножением номинального тока на реактивное сопротивление конденсатора  $x_C$ :

$$U_{к, ном} = I_{ном} x_C = I_{ном} \frac{10^6}{\omega C},$$

где  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота переменного тока;  $C$  — емкость, мкФ;  $f$  — частота напряжения сети, Гц.

Произведя вычисления для частоты  $f = 50$  Гц, получим:

$$U_{к, ном} = 2,4 \frac{10^6}{314 \cdot 18} = 425 \text{ В.}$$

Расхождение с данными, полученными по (19), составляет примерно 4%, что для технических расчетов вполне допустимо.

Расчетное напряжение на конденсаторе по (22)

$$U_{к, р} \approx 2,2U = 2,2 \cdot 220 = 484 \text{ В.}$$

По табл. 6 выбираем девять конденсаторов МБГЧ по 2 мкФ на рабочее напряжение 500 В.

Для отключаемой емкости конденсаторы типа ЭП не подходят по напряжению. Поэтому отключаемую емкость составляем из конденсаторов типа МБГЧ, приняв ее равной

$$C_o \approx 1,5C_{р, ном} = 1,5 \cdot 18 = 27 \text{ мкФ.}$$

По табл. 6 выбираем семь конденсаторов по 4 мкФ на рабочее напряжение 500 В.

Приведенный пример подтверждает целесообразность включения конденсаторного двигателя при отмеченных условиях по схеме, приведенной на рис. 8,б.

**Пример.** Выбрать схему включения конденсаторного двигателя 0,6 кВт, 127/220 В с номинальным током фазы 2,5 А, если напряжение сети равно 127 В. Определить рабочую емкость и выбрать конденсаторы типа КБГ-МН.

Сопоставление приведенных данных по напряжению показывает, что включение двигателя возможно по схемам, приведенным на рис. 8,б или в. Произведем вычисления для обеих схем.

*Схема, приведенная на рис. 8,б.*

Рабочая емкость по (13)

$$C_{p, \text{ном}} \approx 4800 \frac{I_{\text{ном}}}{U} = 4800 \frac{2,5}{127} = 94 \text{ мкФ.}$$

Расчетное напряжение на конденсаторе по (20)

$$U_{к,р} \approx 1,15U = 1,15 \cdot 127 = 146 \text{ В.}$$

По табл. 4 для частоты 50 Гц выбираем конденсаторы емкостью от 4 до 10 мкФ с допустимым напряжением переменного тока 220 В, что соответствует номинальному напряжению постоянного тока 400 В, обозначенному на конденсаторах.

По табл. 3 для рабочего напряжения постоянного тока 400 В выбираем 16 конденсаторов по 6 мкФ.

*Схема, приведенная на рис. 8,в.*

Рабочая емкость по (14)

$$C_{p, \text{ном}} \approx 1600 \frac{I_{\text{ном}}}{U} = 1600 \frac{2,5}{127} = 32 \text{ мкФ.}$$

Расчетное напряжение на конденсаторе по (22)

$$U_{к,р} \approx 2,2U = 2,2 \cdot 127 = 280 \text{ В.}$$

По табл. 4 для частоты 50 Гц выбираем конденсаторы емкостью 2 мкФ с допустимым напряжением переменного тока 300 В, что соответствует номинальному напряжению постоянного тока 600 В.

По табл. 3 для рабочего напряжения постоянного тока 600 В выбираем 16 конденсаторов по 2 мкФ.

При относительно невысоком напряжении на конденсаторах схема, приведенная на рис. 8,в, в данном конкретном случае отличается меньшими емкостью и стоимостью конденсаторов.

## **9. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН**

Величины, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону, изображают графически с помощью волновых и векторных диаграмм. Ограничимся рассмотрением векторных диаграмм.

*Вектором* в общем случае называют направленный отрезок. Так как ток характеризуется определенным значением и направлением, то он может быть представлен в виде вектора.

Чтобы отразить физическую картину синусоидальных изменений, мы должны принять, что вектор тока вра-

щается (например, в направлении против часовой стрелки) с равномерной угловой скоростью

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (23)$$

где  $T$  — период, т. е. время поворота вектора на угол, равный  $2\pi$ , рад.

Углы поворота вектора  $\psi$  условимся отсчитывать от положительного направления оси  $Ox$ , а направление тока в фазе определять по знаку проекции вектора на вертикальную ось. За положительное направление тока в фазе примем направление его от начала фазы к концу.

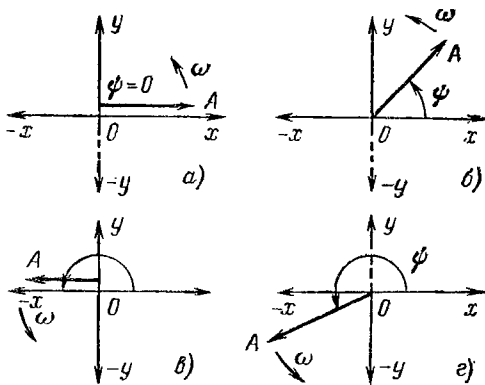


Рис. 11. Векторные диаграммы вращающегося вектора тока в различные моменты времени.

Предположим, что ток фазы  $I=3$  А. При произвольно выбранном масштабе  $m_I=0,1$  А/мм длина вектора тока  $\vec{I}$  составит 30 мм (рис. 11). В начальный момент времени ( $\psi=0$ , рис. 11,а) и в момент, наступающий через половину периода ( $\psi=\pi$ , рис. 11,в), проекции вектора тока на вертикальную ось равны нулю. Это указывает на то, что в отмеченные моменты времени ток фазы, изменяясь, проходит через нулевое значение.

Во все другие моменты времени проекции вектора  $OA$  на вертикальную ось не равны нулю. Заметим, что по ним можно судить о мгновенных значениях тока.

Положению вектора  $OA$  на рис. 11,б соответствует направление тока от начала фазы к концу, а положе-

нию, изображенному на рис. 11,2, — направление от конца к началу.

Направление переменного тока изменяется по полупериодам. К этому же выводу мы приходим из рассмотрения векторных диаграмм.

К моменту времени  $t=T$ , соответствующему повороту вектора  $OA$  на угол  $\psi=2\pi$ , заканчивается полный цикл изменений тока. Во втором и последующих периодах эти изменения повторяются.

Аналогичным образом синусоидально изменяющееся напряжение можно изобразить графически в виде вектора  $\dot{U}$ , вращающегося против направления вращения часовой стрелки с угловой частотой  $\omega$ .

Диаграммы тока и напряжения удобно совместить, т. е. показать в одной системе координат. Совместные векторные диаграммы тока и напряжения фазы используются для получения расчетных соотношений. Обычно они строятся для одного какого-либо момента времени, выбранного произвольно. При этом система координат на график не наносится.

Вращающиеся векторы тока и напряжения остаются неподвижными относительно друг друга, так как частоты вращения их равны, а направления вращения совпадают. Между ними в общем случае возникает сдвиг во времени, соответствующий фазовому углу  $\varphi$ . Угол сдвига векторов тока и напряжения фазы зависит от характера нагрузки.

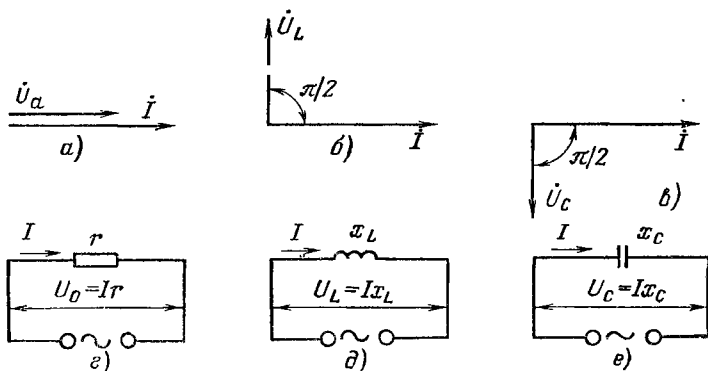


Рис. 12. Совместные векторные диаграммы тока и напряжений (а—в), соответствующие схемам включения в цепь переменного тока активного (в), индуктивного (г) и емкостного (е) сопротивлений.

В цепи переменного тока различают активное сопротивление  $r$ , индуктивное сопротивление  $x_L$  и емкостное сопротивление  $x_C$ . Независимо от числа и комбинации этих сопротивлений в конкретной цепи они всегда могут быть заменены одним эквивалентным, или полным, сопротивлением  $z$ .

Из курса электротехники известно, что ток совпадает по фазе с активным падением напряжения ( $\varphi=0$ ), т. е. с падением напряжения на активном сопротивлении, отстает от индуктивного падения напряжения на угол  $\varphi=\pi/2$  и опережает падение напряжения на конденсаторе на угол  $\varphi=\pi/2$ .

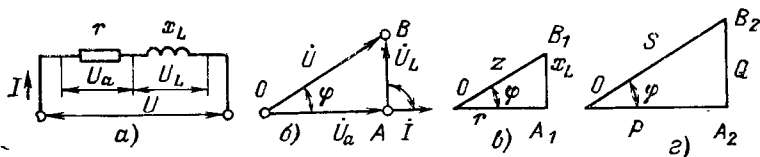


Рис. 13. Включение статорной обмотки двигателя на переменное напряжение.

*a* — принципиальная схема; *б* — векторная диаграмма тока и напряжений; *в* — треугольник сопротивлений; *г* — треугольник мощностей.

Совместные диаграммы тока и напряжений показаны на рис. 12. При их рассмотрении необходимо помнить, что за направление вращения векторов принято направление против часовой стрелки.

Пользуясь отмеченными правилами, нетрудно выполнить построение векторной диаграммы токов и напряжений для приемника, содержащего качественно различные сопротивления.

Представим фазу двигателя переменного тока в виде электрической цепи, состоящей из активного и индуктивного сопротивлений, соединенных последовательно (рис. 13,а).

Активное сопротивление отражает процессы преобразования электрической энергии в двигателе, о которых говорилось выше. Наличие индуктивного сопротивления указывает на то, что, кроме активной, двигатель получает из сети реактивную мощность, необходимую для образования магнитного поля.

Векторная диаграмма тока и напряжений фазы двигателя показана на рис. 13,б. Методика ее построения следующая. Сначала откладываем в произвольном мас-

штабе вектор тока. В данном случае направление вектора тока принято совпадающим с положительным направлением оси абсцисс. Затем, пользуясь масштабом напряжения, выбранным также произвольно, наносим вектор активного падения напряжения (отрезок  $OA$ ), совпадающего по фазе с током. Далее из точки  $A$  проводим вектор индуктивного падения напряжения ( $AB$ ), опережающего ток по фазе на угол  $\pi/2$ .

Сложив геометрически векторы  $OA$  и  $AB$ , получаем значение и направление вектора напряжения сети ( $OB$ ), приложенного к фазе двигателя. Как видно, ток фазы двигателя отстает от напряжения, приложенного к фазе, на угол  $\varphi < \pi/2$ , что и характерно для активно-индуктивного характера нагрузки.

Треугольник  $OAB$  называется треугольником напряжений. Из него по известной теореме Пифагора находим<sup>1</sup>:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}; \quad U_a = \sqrt{U^2 - U_L^2}; \quad U_L = \sqrt{U^2 - U_a^2},$$

или

$$U_a = U \cos \varphi; \quad U_L = U \sin \varphi.$$

Поделив стороны треугольника напряжений на одну и ту же величину (на ток  $I$ ), получим подобный ему треугольник сопротивлений (рис. 13,б) со сторонами

$$r = \frac{U_a}{I}; \quad x_L = \frac{U_L}{I}; \quad z = \frac{U}{I}.$$

Из треугольника сопротивлений устанавливаем, что полное сопротивление цепи связано со своими составляющими соотношениями:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}; \quad r = \sqrt{z^2 - x_L^2}; \quad x_L = \sqrt{z^2 - r^2};$$

$$r = z \cos \varphi; \quad x_L = z \sin \varphi.$$

Умножив стороны треугольника напряжений на ток  $I$ , переходим к подобному треугольнику мощностей (рис. 13,в), так как

$$UI = S; \quad U_a I = P; \quad U_L I = Q.$$

<sup>1</sup> Здесь и в дальнейшем мы будем пользоваться действующими значениями тока и напряжения, т. е. такими, которые регистрируются приборами, включенными в цепь переменного тока.

Уравнения связи между полной мощностью и ее составляющими устанавливаются аналогично:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad P = \sqrt{S^2 - Q^2}; \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2};$$

$$P = S \cos \varphi; \quad Q = S \sin \varphi.$$

Исходными при построении векторных диаграмм являются векторы тока и напряжения. Если их положение задано, то, как видно из рис. 13,б, нетрудно получить составляющие напряжения, приложенного к цепи. Для этого достаточно вектор напряжения  $\dot{U}$  спроектировать на взаимно перпендикулярные направления, одно из которых совпадает с направлением вектора тока.

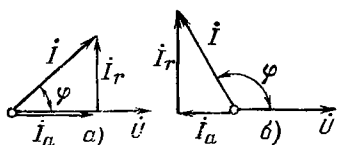


Рис. 14. Разложение вектора тока на активную и реактивную составляющие при  $\varphi < \pi/2$  (а) и  $\varphi > \pi/2$  (б).

Аналогичным образом вектор тока можно представить в виде геометрической суммы активной  $I_a$  и реактивной  $I_r$  составляющих. Первая из них совпадает по фазе с вектором напряжения, вторая перпендикулярна ему.

На диаграмме рис. 14,а ток опережает напряжение по фазе на угол  $\varphi < \pi/2$ , что указывает на активно-емкостный характер нагрузки.

Из диаграммы следует:

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_r = I \sin \varphi; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}.$$

Составляющие тока характеризуют активную и реактивную мощности цепи. Действительно, приведенные выше формулы для мощностей можно представить в виде

$$P = UI \cos \varphi = UI_a; \quad Q = UI \sin \varphi = UI_r,$$

и если  $U = \text{const}$ , то  $P \propto I_a$ ,  $Q \propto I_r$ .

Условимся считать, что активная мощность положительна, если фазовый угол  $\varphi = 0$ , или  $|\varphi| < \pi/2$  (рис. 12,а, 13 и 14,а). При  $\varphi = \pi/2$  она равна нулю (рис. 12,б, в) и при  $|\varphi| > \pi/2$  (рис. 14,б) становится отрицательной. Знак активной мощности указывает на направление ее передачи. О направлении активной мощности можно судить по фазе активной составляющей тока.

Из сопоставления векторных диаграмм (рис. 14) следует, что если активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением, то активная мощность поступает из сети, т. е. расходуется в цепи приемника. Пример, что в этом случае активная мощность положительна ( $P > 0$ ). Если активная составляющая тока находится в противофазе с приложенным напряжением, то активная мощность отдается в сеть, т. е. является отрицательной ( $P < 0$ ).

## 10. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ НАГРУЗКИ

Токи фаз асинхронного трехфазного двигателя при симметричном трехфазном включении возрастают по мере увеличения нагрузки, а фазные напряжения остаются постоянными (предполагается, что питающая сеть обладает достаточно большой мощностью). При этом имеют место равенства:

$$\begin{aligned} I_A &= I_B = I_C; \\ U_A &= U_B = U_C = \text{const}; \\ \cos \varphi_A &= \cos \varphi_B = \cos \varphi_C, \end{aligned}$$

где  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  — токи первой, второй и третьей фаз;  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  — фазные напряжения.

Фазные напряжения сдвинуты относительно друг друга во времени на  $1/3$  периода. Соответственно на  $1/3$  периода сдвинуты относительно друг друга токи фаз.

Фазовый угол сдвига  $\varphi$  между током и напряжением фазы зависит от нагрузки. С увеличением последней он уменьшается, а коэффициент мощности  $\cos \varphi$  возрастает.

При включении двигателя в сеть однофазного тока в качестве конденсаторного симметрия токов и напряжений статорных обмоток нарушается. Мощность двигателя при этом недоиспользуется, а зависимости токов и напряжений от нагрузки приобретают различный характер.

Условимся считать, что при включении конденсаторного двигателя по любой из рассмотренных схем напряжение сети  $U$  и рабочая емкость  $C_p$  остаются постоянными, причем  $C_p = C_{p, \text{ном}}$ . Токи, напряжения и скольжение выразим в относительных единицах, т. е. в долях номинальных величин.

Зависимости токов от скольжения конденсаторного двигателя, статорные обмотки которого соединены звездой (рис. 15,а), иллюстрируются кривыми, приведенными на рис. 15,б.

Ток фазы *A* с увеличением нагрузки возрастает, фазы *C* уменьшается, а фазы *B* изменяется неоднозначно, т. е. сначала уменьшается, затем, достигнув минимального значения, начинает возрастать. Заметим, что и для других схем включения конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками характерна следующая особенность: фаза, ток которой с изменением нагрузки изменяется неоднозначно, при холостом ходе переходит в генераторный режим.

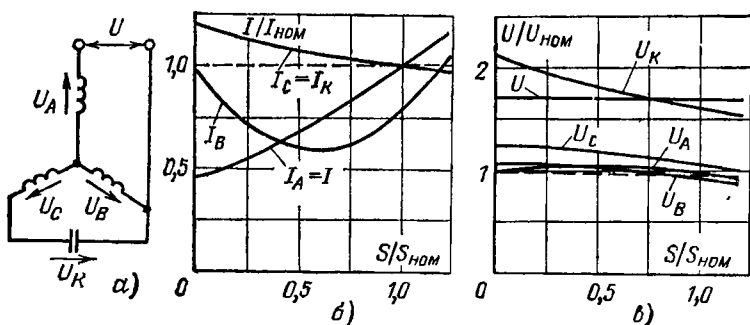


Рис. 15. Соединение статорных обмоток звездой конденсаторного двигателя.

а — принципиальная схема; б — графики зависимости токов; в — графики зависимости напряжений от скольжения при  $C_p = C_{p, \text{ном}}$ .

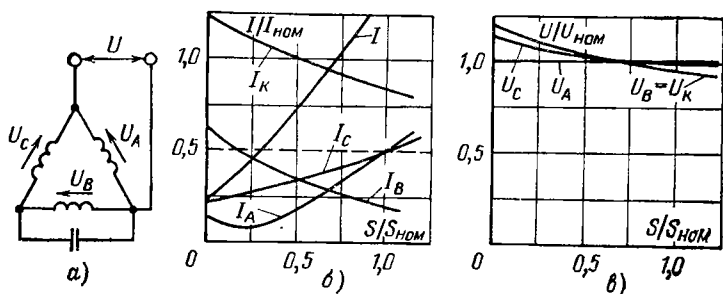


Рис. 16. Соединение статорных обмоток треугольником конденсаторного двигателя.

а — принципиальная схема; б — графики зависимости токов; в — графики зависимости напряжений от скольжения при  $C_p = C_{p, \text{ном}}$ .

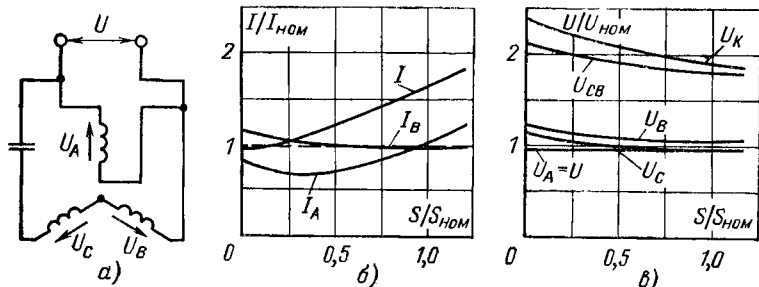


Рис. 17. Соединение двух статорных обмоток последовательно с конденсатором конденсаторного двигателя.

а — принципиальная схема; б — графики зависимости токов; в — графики зависимости напряжений от скольжения при  $C_p = C_{p, \text{ном}}$ .

Напряжение на конденсаторе, уменьшающееся с нагрузкой, соизмеримо с напряжением сети (рис. 15, в). Фазные напряжения неодинаковы.

При соединении обмоток двигателя в треугольник (рис. 16, а) зависимости токов от скольжения аналогичны кривым, приведенным на рис. 15, б. Неоднозначное изменение тока относится в данном случае к фазе А.

Ток конденсатора  $I_K$  существенно превышает номинальный ток фазы, так как для схемы на рис. 16, а характерна значительная емкость  $C_{p, \text{ном}}$  [см. формулу (13)].

Фазные напряжения  $U_B$  и  $U_C$  в режиме номинальной нагрузки практически равны напряжению первой фазы  $U_A$  (рис. 16, в).

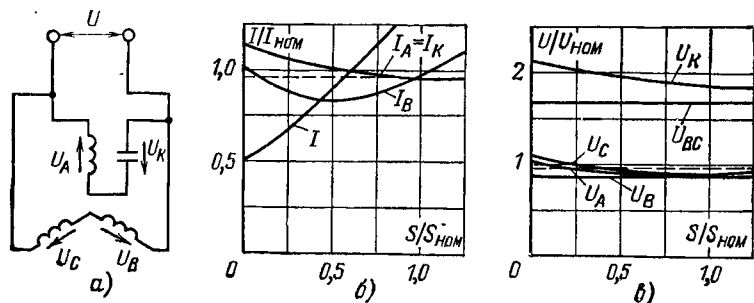


Рис. 18. Соединение одной статорной обмотки последовательно с конденсатором конденсаторного двигателя.

а — принципиальная схема; б — графики зависимости токов; в — графики зависимости напряжений от скольжения при  $C_p = C_{p, \text{ном}}$ .

Графики токов двигателя с конденсатором, включенным в цепь двух статорных обмоток (рис. 17,а), нанесены на рис. 17,б. Ток конденсаторной фазы с увеличением скольжения уменьшается, главной фазы — изменятся неоднозначно.

Напряжение на конденсаторе (рис. 17,в) значительно превышает напряжение сети, с чем необходимо считаться на практике. Напряжения статорных обмоток исходного трехфазного двигателя в режиме номинальной нагрузки несущественно отличаются по величине.

При включении двигателя по схеме, приведенной на рис. 18,а, зависимости токов от скольжения (рис. 18,б) аналогичны графикам, показанным на рис. 17,б.

Напряжение на конденсаторе несколько выше напряжения сети (рис. 18,в). Статорные обмотки исходного трехфазного двигателя находятся под напряжением, близким к номинальному.

Ток конденсаторной фазы независимо от схемы включения двигателя имеет один и тот же характер — он уменьшается с увеличением нагрузки. Поясним сказанное.

Конденсаторная фаза (например, фаза А рис. 18,а) может быть представлена в виде электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных активного  $r$ , индуктивного  $x_L$  и емкостного  $x_C$  сопротивлений. Реактивные сопротивления фазы связаны неравенством

$$x_C > x_L,$$

отвечающим необходимому сдвигу во времени (приблизительно на четверть периода) токов главной и конденсаторной фаз.

Если, пользуясь правилами, изложенными выше (см. с. 34—38), построить с учетом приведенного неравенства прямоугольный треугольник напряжений для цепи конденсаторной фазы и затем разделить его стороны на ток фазы  $I_A$ , то получим подобный ему треугольник сопротивлений с катетами  $r$ ,  $x_C - x_L$  и гипотенузой  $z$ , пропорциональной полному сопротивлению цепи, причем

$$z = \sqrt{r^2 + (x_C - x_L)^2},$$

где  $x_C = \frac{1}{\omega C_p} = \text{const}$  ( $C_p = \text{const}$ ).

Сопротивления  $r$  и  $x_L$  зависят от режима работы (скольжения), т. е. являются переменными.

Определяющее влияние на характер изменения величины сопротивления  $z$  оказывает индуктивное сопротивление  $x_L$ . Последнее с увеличением нагрузки уменьшается. В результате полное сопротивление цепи конденсаторной фазы возрастает, а ток фазы при условии  $U = \text{const}$  уменьшается.

## 11. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Векторные диаграммы являются наглядным и вместе с тем достаточно точным средством исследования режимов работы машин переменного тока. Они могут быть построены для первичной (статорной) и вторичной (роторной) цепей. Применительно к конденсаторному двигателю ограничимся рассмотрением векторных диаграмм токов и напряжений статорных цепей.

Исходными данными для построения векторных диаграмм являются токи, напряжения и активные мощности обмоток, а также ток и напряжение сети. Все эти величины могут быть получены экспериментально.

Методика построения векторных диаграмм состоит в следующем:

для рассматриваемой схемы включения двигателя составляется система уравнений токов и напряжений;

один из векторов, входящих в систему уравнений, принимается за исходный и в определенном, удобном для построения масштабе изображается на чертеже;

после исходного вектора вычерчиваются остальные.

Масштабы токов и напряжений выбираются независимо друг относительно друга.

Для данного режима работы относительная ориентация векторов на диаграмме остается неизменной. Однако положение каждого из них определяется (задается) положением исходного вектора. Условимся в качестве последнего принимать вектор напряжения сети, полагая, что в рассматриваемый момент времени его направление совпадает с положительным направлением оси абсцисс.

Как графические построения векторные диаграммы иллюстрируют связи между напряжениями или токами, вытекающие из законов Кирхгофа.

Для соединения статорных обмоток двигателя в звезду (рис. 15,а) получим:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B = \dot{U}; \quad (24a)$$

$$\dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_K; \quad (24б)$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B + \dot{I}_C, \quad (24в)$$

причем

$$\dot{I}_A = \dot{I}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_K,$$

где  $I$  — ток двигателя;  $I_K$  — ток конденсатора.

Отложив вектор напряжения сети в положительном направлении оси абсцисс, определяем в соответствии с уравнением (24а) положение векторов фазных напряжений  $\dot{U}_A$  и  $\dot{U}_B$  с помощью циркуля методом засечек. Дуги окружностей с радиусом, пропорциональным фазным напряжениям  $U_A$  и  $U_B$ , проведенные из начала и конца вектора напряжения сети  $\dot{U}$ , пересекаются в двух точках. Тем не менее истинное решение является единственным. Правильность его подтверждается последующим построением. Примем, что векторы напряжений уравнения (24а) имеют последовательность  $\dot{U}_A - \dot{U} - \dot{U}_B$  (при вращении векторов против часовой стрелки), показанную на рис. 19.

Напряжение фазы  $B$  согласно (24) определяется геометрической суммой напряжений фазы  $C$  и конденсатора. Прделав аналогичный прием, находим положение векторов  $\dot{U}_C$  и  $\dot{U}_K$ . После этого нетрудно построить векторную диаграмму токов. Предварительно

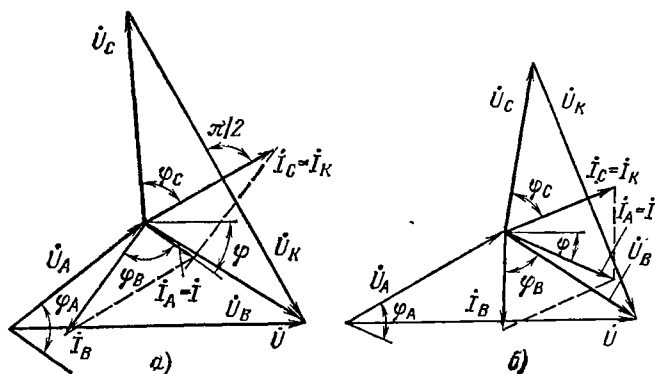


Рис. 19. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме, показанной на рис. 15,а.

а — при холостом ходе; б — при номинальной нагрузке.

расчетом определяются коэффициенты мощности по формулам

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_A &= \frac{P_A}{U_A I_A}; \\ \cos \varphi_B &= \frac{P_B}{U_B I_B}; \\ \cos \varphi_C &= \frac{P_C}{U_C I_C}; \\ \cos \varphi &= \frac{P_1}{UI} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

и фазовые углы сдвига  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  и  $\varphi$ .

Сопротивления обмоток двигателя имеют активно-индуктивный характер, поэтому токи обмоток отстают от приложенных к ним напряжений на соответствующие фазовые углы сдвига.

Построив таким образом векторы токов, следует убедиться в том, что выполняется условие, выражаемое уравнением (24в), причем ток фазы  $C$ , равный току конденсатора, опережает напряжение конденсатора на угол, равный  $\pi/2$ .

Векторные диаграммы токов и напряжений статорных цепей двигателя при холостом ходе и номинальной нагрузке, построенные по (24) и (25), показаны на рис. 19,а и б.

В режиме холостого хода (рис. 19,а) активные мощности первой и третьей фаз положительны ( $P_A > 0$ ,  $P_C > 0$ ). Действительно, фазовые углы сдвига  $\varphi_A < \pi/2$ ,  $\varphi_C < \pi/2$ ; активные составляющие токов обмоток ( $I_A \cos \varphi_A$ ,  $I_C \cos \varphi_C$ ) совпадают по фазе соответственно с напряжениями  $U_A$  и  $U_C$ . Следовательно, мощности  $P_A$  и  $P_C$  потребляются, т. е. поступают из сети (см. с. 34—38).

Активная мощность второй фазы отрицательна ( $P_B < 0$ ), активная составляющая тока  $I_B \cos \varphi_B$  сдвинута относительно напряжения  $U_B$  на  $180^\circ$ , т. е. находится с ним в противофазе. Это означает, что фаза  $B$  генерирует активную мощность, т. е. возвращает ее в сеть. Выше было показано, что ток фазы  $B$  с нагрузкой изменяется неоднозначно. Так же неоднозначно изменяется и мощность этой фазы  $P_B$ .

Появление нагрузки приводит к изменению не только  $I_B$  (рис. 15,б), но и его фазы. Вектор тока  $I_B$  смещается в направлении против часовой стрелки. При  $\varphi_B = \pi/2$  мощность  $P_B = U_B I_B \cos \varphi_B$  проходит через нулевое значение и затем, изменив свой знак, начинает возрастать.

В режиме номинальной нагрузки (рис. 19,б) несимметрия токов и напряжений уменьшается, коэффициент мощности двигателя возрастает, приближаясь к единице (из диаграммы  $\cos \varphi \approx 0,92$ ), активные мощности всех статорных обмоток положительны, т. е. в соответствии с изложенным выше преобразуются в полезную мощность на валу и в мощность, компенсирующую потери внутри машины.

По векторным диаграммам можно проследить не только за изменением токов и напряжений при переходе двигателя из режима холостого хода к номинальной нагрузке, но и за изменением активных и реактивных мощностей фаз.

Сопоставляя диаграммы (рис. 19), можно прийти к выводам, справедливым и для других схем конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками:

1. Статорная обмотка исходного трехфазного двигателя, ток которой с изменением нагрузки от 0 до номинальной изменяется неоднозначно, имеет неоднозначный характер изменения активной мощности и при холостом ходе находится в генераторном режиме.

2. Токи фаз  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  отстают от фазных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  соответственно на углы  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$ . Это означает, что конденсаторный двигатель, так же как и двигатель, работающий от сети трехфазного тока, всегда находится в режиме потребления реактивной мощности. Источником последней являются конденсаторы и сеть.

Уравнения напряжений и токов двигателя при соединении статорных обмоток в треугольник (рис. 16,а) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_B + \dot{U}_C; \\ \dot{I}_A + \dot{I}_C &= \dot{I}; \\ \dot{I}_B + \dot{I}_A &= \dot{I}_C, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

причем  $\dot{U}_A = \dot{U}$ .

Векторные диаграммы токов и напряжений двигателя показаны на рис. 20,а и б.

Ток конденсатора опережает напряжение  $\dot{U}_B$  по фазе на угол  $\varphi_K = \pi/2$ .

Активные мощности второй и третьей фаз при холостом ходе положительны (рис. 20,а), т. е.  $P_B > 0$ ,  $P_C > 0$ .

Мощность первой фазы отрицательна ( $P_A < 0$ ), что указывает на неоднозначный характер ее изменения с изменением нагрузки.

При номинальном режиме (рис. 20,б) мощности всех фаз положительны. Коэффициент мощности практически равен единице (из диаграммы  $\cos \varphi = 0,98$ ).

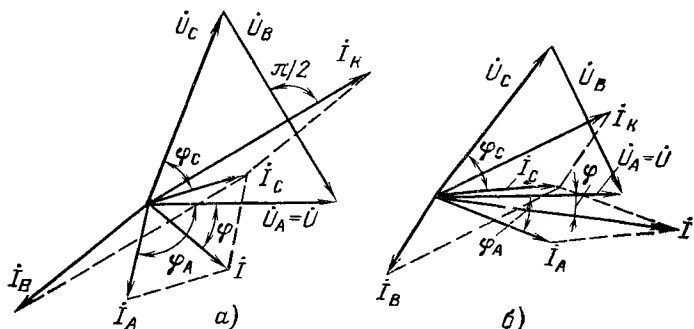


Рис. 20. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме, показанной на рис. 16,а.

а — при холостом ходе; б — при номинальной нагрузке.

Уравнения напряжений и токов двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 17,а, представим в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_C - \dot{U}_B &= \dot{U}_{CB}; \\ \dot{U}_{CB} + \dot{U}_K &= \dot{U}_A; \\ I_A + I_C &= I; \\ I_B &= -I_C, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

причем

$$\dot{U}_A = \dot{U}; \quad I_C = I_K.$$

Соответствующие им векторные диаграммы показаны на рис. 21,а и б.

Ток  $I_C$  опережает напряжение конденсатора  $U_K$  по фазе на угол  $\varphi_K = \pi/2$ .

Из диаграммы для холостого хода (рис. 21,а) находим:

$$P_A < 0 (\varphi_A > \pi/2); P_B > 0 (\varphi_B < \pi/2); P_C \approx 0 (\varphi_C \approx \pi/2),$$

т. е. первая фаза исходного трехфазного двигателя находится в генераторном режиме, а вторая — в двигательном. Активная мощность третьей фазы близка к нулю.

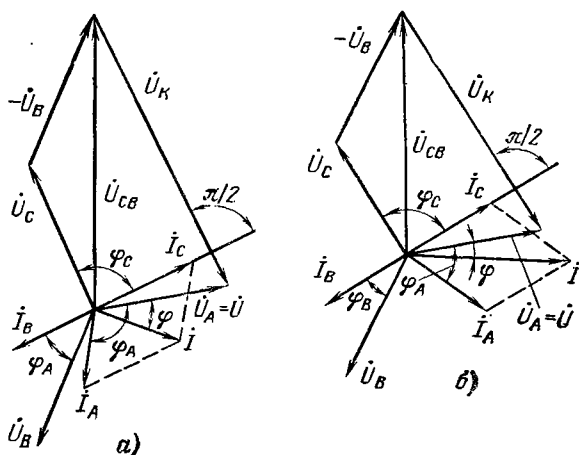


Рис. 21. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме рис. 17,а.

а — при холостом ходе; б — при номинальной нагрузке.

При номинальной нагрузке (рис. 21,б) токи фаз равны номинальному току, коэффициент мощности двигателя близок к единице (из диаграммы  $\cos \varphi \approx 0,96$ ). Активные мощности обмоток  $P_A > 0, P_B > 0, P_C \approx 0$ . В двигательном режиме находятся только две статорные обмотки.

Из сопоставления диаграмм (рис. 21) следует, что одна из статорных обмоток двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 17,а, с возрастанием нагрузки от 0 до номинальной активную мощность не развивает. Поэтому использование мощности двигателя ухудшается. Заметим, что если путем переключения фазы А (рис. 17,а) изменить направление вращения двигателя, то изменится порядок следования фаз и статорные обмотки фаз В и С поменяются ролями.

Уравнения напряжений и токов двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 18,а, могут быть записаны в виде

$$\dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC}; \quad (28a)$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_K = \dot{U}; \quad (28б)$$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B = \dot{I}; \quad (28в)$$

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_C, \quad (28г)$$

причем

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}; \quad I_A = I_K.$$

Соответствующие им векторные диаграммы представлены на рис. 22,а и б.

Ток фазы А опережает напряжение конденсатора  $U_K$  по фазе на угол  $\varphi_K = \pi/2$ .

При холостом ходе (рис. 22,а) первые две фазы исходного трехфазного двигателя потребляют активную мощность, а третья ее генерирует:

$$P_A > 0 \quad (\varphi_A < \pi/2); \quad P_B > 0 \quad (\varphi_B < \pi/2); \quad P_C < 0 \quad (\varphi_C > \pi/2).$$

В режиме номинальной нагрузки (рис. 22,б) токи фаз равны номинальному току. Мощности всех статорных обмоток положительны, коэффициент мощности двигателя близок к единице (из диаграммы  $\cos \varphi \approx 0,96$ ).

Токи главной и конденсаторной фаз сдвинуты на угол  $\alpha \approx \pi/2$ , вследствие чего вращающееся магнитное поле машины становится практически круговым. Из рассмотрения диаграммы непосредственно следует, что для конденсаторного двигателя, включенного по схеме,

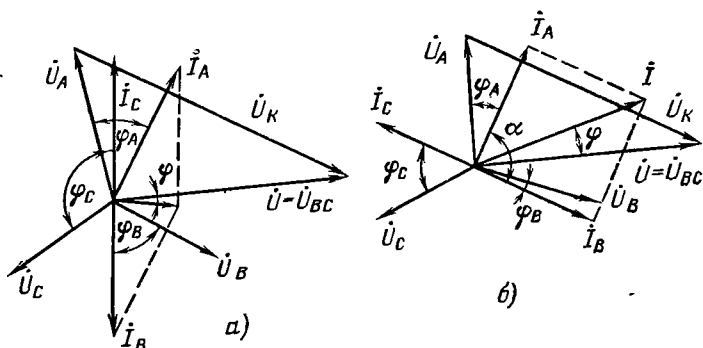


Рис. 22. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме, показанной на рис. 18,а.

а — при холостом ходе; б — при номинальной нагрузке.

приведенной на рис. 18,а, характерно улучшенное использование его мощности. Как было отмечено выше, эта схема является наиболее рациональной.

## 12. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЕМКОСТИ

Рассмотрим расчетное определение рабочей емкости применительно к схеме включения конденсаторного двигателя, показанной на рис. 18,а, полагая, что в воздушном зазоре машины создается круговое вращающееся магнитное поле. При этом м. д. с. главной и конденсаторной фаз, сдвинутые относительно друг друга в пространстве на  $90^\circ$  и во времени на четверть периода, равны (см. рис. 7,б):

$$I_{г,ф} \omega_{г,ф} = I_{к,ф} \omega_{к,ф},$$

где  $\omega_{г,ф}$  — число витков главной фазы;  $\omega_{к,ф}$  — число витков конденсаторной фазы, равное числу витков статорной обмотки исходного трехфазного двигателя. Из схемы, приведенной на рис. 18,а, следует очевидное равенство  $\omega_{к,ф} = \omega_A$ .

Установим соотношение между числами витков главной и конденсаторной фаз. Обратимся к рис. 7,б, из которого видно, что намагничивающее действие тока  $I_{г,ф}$ , проходящего по двум статорным обмоткам исходного трехфазного двигателя, соединенным последовательно, эквивалентно намагничивающему действию одной статорной обмотки (главной фазы) с числом витков  $\omega_{г,ф}$ , по которой проходит тот же ток, причем ось главной фазы сдвинута в пространстве относительно оси конденсаторной фазы на  $90^\circ$ .

Если принять, что ток главной фазы  $I_{г,ф} = 1$  отн. ед., то отрезки  $02$ ,  $03$  и  $04$  будут пропорциональны числам витков соответствующих обмоток.

Следовательно,

$$\omega_{г,ф} = \omega_B \cos 30^\circ + \omega_C \cos 30^\circ = \sqrt{3} \omega_{к,ф},$$

где  $\omega_B = \omega_C = \omega_A = \omega_{к,ф}$ .

Из условия равенства м. д. с., приведенного выше, находим зависимость между токами обмоток:

$$I_{г,ф} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{к,ф}.$$

Примем, что напряжения и токи двигателя образуют симметричные двухфазные системы. Тогда треугольник

Напряжений статорных цепей в отличие от треугольных напряжений, изображенных на рис. 22, становится прямоугольным с углом  $(\widehat{U_{к, ф}}, U) = 30^\circ$ . Из него получаем:

$$U_{к, ф} = \frac{U_{г, ф}}{\cos 30^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{г, ф} = \frac{2}{\sqrt{3}} U;$$

$$U_{г, ф} = U_{к, ф} \sin 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{г, ф} = \frac{1}{\sqrt{3}} U.$$

Полные мощности главной и конденсаторной фаз равны:

$$U_{г, ф} I_{г, ф} = U_{к, ф} I_{к, ф},$$

в чем легко убедиться по приведенным выше уравнениям связи между токами и напряжениями фаз.

Из последнего выражения вытекает, что полная мощность, потребляемая двигателем из сети, может быть представлена в виде соотношения

$$S = 2 U_{г, ф} I_{г, ф} = 2 U I_{г, ф}.$$

Реактивная мощность конденсаторов при круговом вращающемся поле равна полной мощности двигателя:

$$Q_{к, ф} = U_{к, ф} I_{к, ф} = \frac{2}{\sqrt{3}} U \sqrt{3} I_{г, ф} = 2 U I_{г, ф}.$$

С другой стороны,

$$Q_{к, ф} = I_{к, ф}^2 X_C = \frac{I_{к, ф}^2}{\omega C}.$$

Приравняв правые части последних выражений и учитывая зависимость между токами главной и конденсаторной фаз, находим емкость конденсаторов при круговом вращающемся поле в фарадах

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{к, ф}}{\omega U}$$

или в микрофарадах

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{к, ф}}{\omega U} \cdot 10^6. \quad (29)$$

Из полученных соотношений следует, что при номинальном токе главной фазы  $I_{г, ф} = I_{ном}$  по условию образования кругового вращающегося поля в цепь конденсаторной фазы следует ввести емкость, соответствующую току  $I_{к, ф} = \sqrt{3} I_{ном}$ . Проводники обмоток статора исходного трехфазного двигателя имеют одинаковую

площадь поперечного сечения, поэтому нельзя допустить, чтобы при номинальном токе главной фазы ток конденсаторной фазы составлял 1,73 номинального значения.

Однако нет необходимости добиваться идеальной симметрии токов и напряжений, тем более, что она соответствует только одной определенной нагрузке. Вполне достаточно иметь условия, возможно более близкие к симметричному режиму, когда обратное поле не оказывает заметного влияния на работу двигателя (см. диаграмму на рис. 22,б).

Номинальной нагрузкой конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками следует признать такую нагрузку, при которой токи в обмотках практически равны номинальному току фазы, обозначенному на щитке.

Таким образом, рабочая емкость конденсаторов может быть определена по последнему выражению, в котором значение тока конденсаторной фазы принимается равным номинальному:

$$C_{p, \text{ном}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{\text{ном}}}{\omega U} \cdot 10^6. \quad (30)$$

Применительно к частоте 50 Гц эта формула после подстановки  $\omega = 314$  1/с и сокращений приводится к выражению (15).

Рабочая емкость  $C_{p, \text{ном}}$  в соответствии с (30) при условиях

$$U = \text{const}, \quad \omega = \text{const}$$

пропорциональна номинальному току фазы.

Для номинального тока, выраженного через полную мощность двигателя и фазное значение напряжения, имеем:

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3U_{\text{ном}}}. \quad (31)$$

Последнее выражение с учетом (8) получает вид:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1, \text{ном}}}{3U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (32)$$

Активная мощность  $P_{1, \text{ном}}$ , потребляемая двигателем при номинальной нагрузке, может быть вычислена по (7).

Соотношение (32) характеризует влияние коэффициента мощности на ток. Для одних и тех же значений

полезной мощности и к. п. д. ток двигателя тем меньше, чем выше коэффициент мощности. Объясняется это ограничением удельной намагничивающей мощности (см. рис. 3 и 4), обусловливающим в соответствии с (4) и (31) уменьшение полной мощности и тока. Отсюда становится очевидной зависимость емкости, необходимой для образования в воздушном зазоре машины кругового или практически кругового поля, от коэффициента мощности исходного трехфазного двигателя. Чем выше коэффициент мощности, тем меньше реактивная мощность, ток двигателя, а также рабочая емкость  $C_{р, ном}$ .

**Пример.** Определим рабочую емкость  $C_{р, ном}$  двигателей мощностью 1,1, 1,5 и 2,2 кВт (табл. 1), включенных по схеме, приведенной на рис. 8,2, на напряжении сети 380 В.

Номинальный ток двигателя типа АО2-22-6, мощностью 1,1 кВт равен:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{3U_{ном} \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}} = \frac{1,1 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,73 \cdot 0,76} = 3 \text{ А.}$$

Емкость  $C_{р, ном}$  определяем по (15):

$$C_{р, ном} \approx 2740 \frac{I_{ном}}{U} = 2740 \frac{3}{380} \approx 22 \text{ мкФ.}$$

Аналогичным образом производятся расчеты для остальных двигателей.

Построенные по данным расчетов кривые (рис. 23) иллюстрируют зависимость рабочей емкости  $C_{р, ном}$  от коэффициента мощности  $\cos \varphi_{ном}$  при одном и том же значении номинальной мощности асинхронного двигателя  $P_{ном} = \text{const.}$

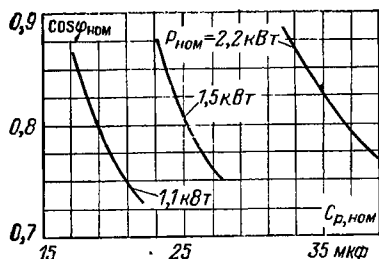


Рис. 23. Зависимости рабочей емкости от коэффициента мощности асинхронного двигателя  $C_{р, ном} = f(\cos \varphi_{ном})$  при  $P_{ном} = \text{const.}$

### 13. РАБОТА КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УСЛОВИЯХ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ ОТ НОМИНАЛЬНЫХ

Наиболее высокие энергетические показатели при эксплуатации конденсаторного двигателя достигаются при соблюдении следующих условий:

1. Не происходит изменения частоты, причём частота равна номинальной ( $f=f_{\text{ном}}$ ).

2. Напряжение на выводах машины равно номинальному.

3. Токи обмоток не превышают номинальных значений.

Последнее условие применительно к схемам, приведенным на рис. 8, в, г, может быть записано в виде

$$I_{\Gamma, \Phi} \approx I_{K, \Phi} \approx I_{\text{ном.}}$$

Выполнение последнего равенства обеспечивается правильным выбором рабочей смкости и соответствующей нагрузкой на валу двигателя.

Изменение частоты не является сколько-нибудь существенным даже в энергосистемах местного значения, поэтому им можно пренебречь.

Непостоянство (снижение) напряжения обычно возникает в часы наибольшей нагрузки сети. При этом в значительно большей степени уменьшается вращающий момент, так как для асинхронного двигателя он пропорционален квадрату приложенного напряжения. Так, например, понижение напряжения сети на 30% вызывает уменьшение момента в 2 раза. В результате такого снижения напряжения двигатель остановится либо будет продолжать вращаться с повышенным скольжением (потребляя большой ток), что может вызвать недопустимый перегрев статорных обмоток, составляющих главную фазу. Отмеченное важное обстоятельство следует иметь в виду, особенно при питании двигателей от электросетей сельских районов с источниками небольшой мощности.

При длительной эксплуатации двигателя с пониженным напряжением необходимо производить соответствующее уменьшение нагрузки.

К нежелательным последствиям с точки зрения нагрева статорных обмоток может привести также несоблюдение третьего условия. Действительно, при всякой нагрузке, превышающей номинальную, перегружается по току главная фаза. То же самое происходит с конденсаторной фазой, только в случае работы с недогрузкой. На холостом ходу ток конденсаторной фазы при выборе рабочей смкости по приведенным выше соотношениям достигает 120—140% номинального. В последнем случае электрические потери возрастают в 2 раза по сравнению с потерями при номинальном токе.

Сказанное позволяет сделать следующие выводы:

нельзя допускать длительную перегрузку или длительную работу двигателя без нагрузки;

при работе двигателя с недогрузкой рабочую емкость конденсаторов необходимо уменьшать.

Для нагрузки, составляющей, например, 50% номинальной, можно принять

$$C_p \approx 0,85 C_{p, \text{ном.}}$$

Ток конденсаторной фазы при этом не превышает номинального значения.

Воспользовавшись графиком, представленным на рис. 24, легко определить рабочую емкость конденсаторов для любой произвольной нагрузки. С этой целью, выразив полезную мощность  $P_2$  в процентах номинальной мощности  $P_{\text{ном.}}$ , находим соответствующее отношение  $C_p/C_{p, \text{ном.}}$ , а затем и искомую емкость. Так, например, для  $P_2 = 0,75 P_{\text{ном.}}$  отношение  $C_p/C_{p, \text{ном.}} = 0,93$  (см. стрелки на рис. 24). Следовательно,  $C_p = 0,93 C_{p, \text{ном.}}$ .

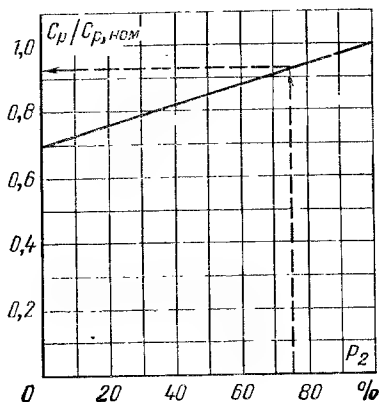


Рис. 24. Зависимость рабочей емкости от нагрузки.

## 14. УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Конденсаторный двигатель прост по конструкции, имеет высокий коэффициент мощности, работает от двухпроводной и, в частности, от осветительной сети.

Как было отмечено, применение рациональных схем включения создает возможность получения достаточно-го пускового момента и приводит к улучшению использования мощности машины. Одну из таких схем (см. рис. 8,2) будем иметь в виду при дальнейшем изложении.

Несмотря на отмеченные положительные свойства, эксплуатация конденсаторного двигателя с рабочей и отключаемой емкостями характеризуется рядом определенных недостатков. Основные из них заключаются в следующем:

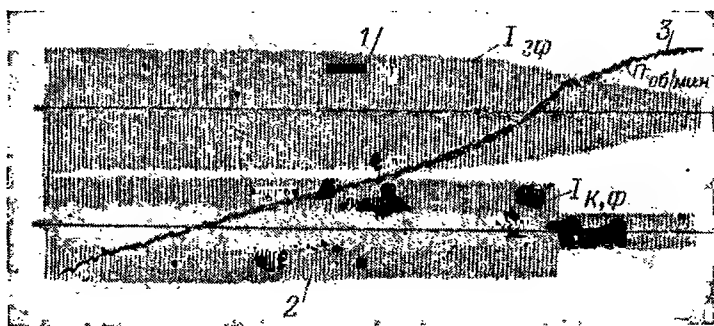


Рис. 25. Осциллограммы, снятые при пуске конденсаторного двигателя с отключаемой емкостью.

1 — ток главной фазы; 2 — ток конденсаторной фазы; 3 — частота вращения.

для создания необходимого пускового момента приходится включать в цепь конденсаторной фазы дополнительную емкость, отключаемую после пуска. При разрыве цепи отключаемой емкости возникающее в месте разрыва искрение уменьшает безопасность эксплуатации двигателя, особенно во взрывоопасных помещениях. Кроме того, резкое уменьшение тока конденсаторной фазы после отключения дополнительной емкости связано с появлением динамических толчков и уменьшением ускорения ротора, что подтверждается осциллограммами (рис. 25);

описанный выше характер изменения тока конденсаторной фазы с изменением нагрузки приводит к ухудшению использования мощности двигателя и уменьшению его перегрузочной способности;

холостой ход конденсаторного двигателя с постоянной рабочей емкостью  $C_{р,ном}$  не только нежелателен, но и опасен, так как ток конденсаторной фазы, достигая в этом случае наибольшего значения, может вызвать недопустимый перегрев обмотки.

Расширение области применения конденсаторного двигателя непосредственно связано с устранением отмеченных недостатков.

Ограничение тока конденсаторной фазы при холостом ходе может быть достигнуто уменьшением емкости конденсаторов. Чтобы далее (с увеличением нагрузки) ток конденсаторной фазы увеличивался, необходимо произ-

водить соответствующее увеличение емкости, т. е. осуществлять ее регулирование. Желательно, чтобы последнее совершалось плавно и автоматически, начиная с момента пуска двигателя.

Автоматическое регулирование эквивалентной емкости в цепи конденсаторной фазы может быть достигнуто различными способами. Один из них основывается на использовании в схеме дросселя насыщения ДН.

Развитие автоматизации производственных процессов в промышленности привело к значительному распространению ДН, что объясняется известными экономическими и эксплуатационными достоинствами этих аппаратов.

Рассмотрим схему включения конденсаторного двигателя (рис. 26), в которой обмотки переменного тока ДН включены на напряжение конденсатора [9].

Дроссель насыщения имеет две обмотки подмагничивания, включенные встречно. Ток одной из них пропорционален току главной фазы двигателя, ток другой — напряжению на конденсаторной фазе.

Первая обмотка имеет небольшое число витков. Действие м. д. с. этой обмотки проявляется тем сильнее, чем больше скольжение, т. е. чем больше ток главной фазы.

Вторая обмотка подмагничивания с большим числом витков является основной. Действие м. д. с. этой обмотки, наоборот, проявляется тем сильнее, чем меньше скольжение, что объясняется характером изменения напряжения на конденсаторной фазе с изменением нагрузки.

В первый момент пуска переменный ток ДН должен быть возможно малым. Очевидно, что при равенстве м. д. с. обмоток подмагничивания он будет равен току холостого хода дросселя.

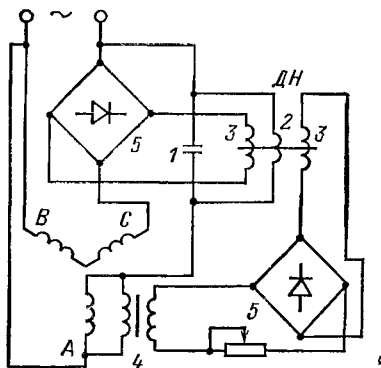


Рис. 26. Схема включения конденсаторного двигателя с регулируемой эквивалентной емкостью.

1 — конденсатор; 2 — обмотки переменного тока дросселя насыщения; 3 — обмотки подмагничивания; 4 — трансформатор напряжения; 5 — выпрямители.

Соблюдение равенства м. д. с. обмоток подмагничивания достигается благодаря тому, что по главной фазе двигателя проходит наибольший (пусковой) ток, а напряжение на конденсаторной фазе в момент пуска приблизительно в 2 раза меньше напряжения по окончании пуска. В результате ток на выходе параллельного участка, образованного конденсатором и обмотками переменного тока  $ДН$ , т. е. ток конденсаторной фазы, достигает своего наибольшего значения, определяемого установленной емкостью. Незначительным током первичной обмотки трансформатора напряжения здесь можно пренебречь.

По мере увеличения частоты вращения двигателя возрастает результирующая м. д. с. подмагничивания, вызывая насыщение дросселя. Переменный ток  $ДН$  при этом увеличивается, а ток конденсаторной фазы уменьшается. При холостом ходе двигателя результирующая м. д. с. подмагничивания  $ДН$  достигает наибольшего значения, вследствие чего ток конденсаторной фазы становится наименьшим.

Каким же становится характер изменения тока конденсаторной фазы после пуска двигателя в ход? Ток конденсаторной фазы, как вытекает из изложенного, становится функцией результирующей м. д. с. подмагничивания дросселя. Так, увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение результирующей м. д. с. подмагничивания  $ДН$ , отчего переменный ток дросселя уменьшается, а ток конденсаторной фазы возрастает. Уменьшение нагрузки приводит к обратному результату, т. е. к уменьшению тока конденсаторной фазы. Заметим, что ток конденсатора и ток обмоток переменного тока  $ДН$  находятся практически в противофазе, так как активные составляющие этих токов пренебрежимо малы. Поэтому численное значение тока конденсаторной фазы всегда определяется арифметической разностью токов регулирующего устройства:

$$I_{к, ф} = I_{к} - I_{дн},$$

где  $I_{к}$  — ток конденсатора;  $I_{дн}$  — ток обмоток переменного тока  $ДН$ .

Из последнего выражения вытекает, что соответствующее изменение тока  $I_{дн}$  равносильно применению в цепи конденсаторной фазы плавно регулируемой эквивалентной емкости.

Для иллюстрации на рис. 27 представлены механические характеристики двигателя типа АОЛ32-4, мощностью 1 кВт, полученные опытным путем. Характеристика 1 относится к схеме с пусковой и рабочей емкостями (см. рис. 8,2). Характеристика 2 относится к схеме, приведенной на рис. 26. Как видно, пусковой момент двигателя для данной емкости конденсатора остается практически одним и тем же в обоих случаях. На участке от  $n=0$  до 1000 об/мин характеристика 2 проходит несколько ниже характеристики 1, что объясняется уменьшением эквивалентной емкости с возрастанием переменного тока ДН.

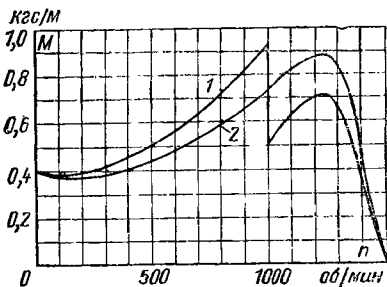


Рис. 27. Механические характеристики конденсаторного двигателя.

Отключение пускового конденсатора в случае использования в цепи конденсаторной фазы отключаемой емкости (см. рис. 8) резко уменьшает вращающий момент (вертикальный участок характеристики 1).

Для двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 26, наоборот, характерны плавный пуск двигателя, увеличенная перегрузочная способность и работа при данной нагрузке на валу с несколько меньшим скольжением.

Приведем пример применения конденсаторного двигателя, включенного по схеме, показанной на рис. 26, в условиях электрической тяги. Целесообразность использования асинхронного конденсаторного двигателя в электрической тяге подтверждается следующим:

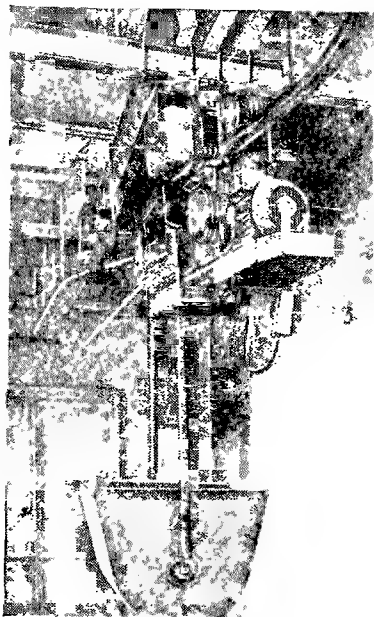
двигатель имеет жесткую скоростную характеристику, вследствие которой средняя частота вращения лишь на несколько процентов отличается от синхронной. Таким образом, буксование при движении ограничивается;

при сверхсинхронной частоте вращения (движение под уклон) машина автоматически переходит в генераторный режим, производя тормозное действие;

как конденсаторный двигатель работает с высоким коэффициентом мощности.

Опытный образец электровоза подвесной дороги с конденсаторным двигателем [11] показан на рис. 28. Двигатель электровоза, типа АОЛ32-4, 1 кВт, 127/220 В, включен по схеме, приведенной на рис. 26, на напряжение сети 220 В.

Контактный провод (полосовая сталь 6×30 мм) крепится на изоляторах. Вторым проводом служит заземленный рельс. Управление электровозом возможно как ручное (кнопочная станция реверсивного магнитного пускателя), так и автоматическое посредством конечных выключателей, установленных в пунктах отправления и выгрузки. Полезная масса с ваза 0,6 т.



Таким образом, одним из способов улучшения эксплуатационных свойств конденсаторного двигателя является применение регулируемой емкости. Плавное и автоматическое изменение эквивалентной емкости с изменением скольжения проще всего достигается с помощью дросселей насыщения.

Конденсаторный двигатель с плавно регулируемой эквивалентной емкостью имеет следующие достоинства:

пуск происходит без переключений в цепи конденсаторной фазы и динамических толчков, неизбежных при пуске с отключаемой емкостью;

уменьшается ток х. х. конденсаторной фазы;

улучшается использование мощности вследствие возрастания тока конденсаторной фазы при увеличении нагрузки на валу;

Рис. 28. Электровоз подвесной дороги с конденсаторным двигателем.

1 — двигатель, 2 — реверсивный магнитный пускатель; 3 — коробки с конденсаторами; 4 — кожух дросселя насыщения; 5 — кнопочная станция для ручного управления.

уменьшается ток х. х. конденсаторной фазы;

улучшается использование мощности вследствие возрастания тока конденсаторной фазы при увеличении нагрузки на валу;

увеличивается перегрузочная способность.

Конденсаторный двигатель, включенный по схеме с автоматически регулируемой эквивалентной емкостью, бесконтактной и искробезопасной, может найти применение в электрической тяге, а также в стационарных установках небольшой мощности.

## **15. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСТРОЙСТВАХ УПРАВЛЕНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Полупроводниковые приборы получили большое распространение в радио- и проводной связи, автоматизированном электроприводе, телевидении и телемеханике, электронных устройствах атомной и ракетной техники, в медицине, физике, металлургии и т. д.

По сравнению с электронными лампами они обладают рядом существенных преимуществ, основными из которых являются:

- 1) отсутствие цепей накала, что дает весьма значительную экономию электроэнергии источников питания;
- 2) малая масса и малые габариты;
- 3) высокая эксплуатационная надежность;
- 4) большой срок службы (до десятков тысяч часов);
- 5) механическая прочность, нечувствительность к сотрясениям и ударам;
- 6) повышенный к. п. д.

Отмеченные достоинства полупроводников обусловили широкое их применение в различных областях науки и техники.

К недостаткам этих приборов относятся:

- 1) разброс параметров;
- 2) зависимость параметров от температуры;
- 3) меньшие по сравнению с электронными лампами значения входных сопротивлений.

Заметим, что указанные недостатки не являются принципиально непреодолимыми, а некоторые из них могут быть устранены или ослаблены путем соответствующих схемных решений.

**Основные свойства полупроводниковых приборов.** Принцип действия полупроводниковых приборов основан на явлении односторонней проводимости, возникающей при контакте полупроводника с металлом или при контакте двух полупроводников. В полупроводниках

создается избыток дырок (полупроводники  $p$ -типа) или электронов (полупроводники  $n$ -типа). В зависимости от их структурной схемы различают *диоды* (два электрода), *триоды*, или *транзисторы* (три электрода), и *тиристоры* (четыре электрода). Возможны и более сложные структуры полупроводниковых приборов. Основными носителями зарядов являются дырки в полупроводниках  $p$ -типа и электроны в полупроводниках  $n$ -типа.

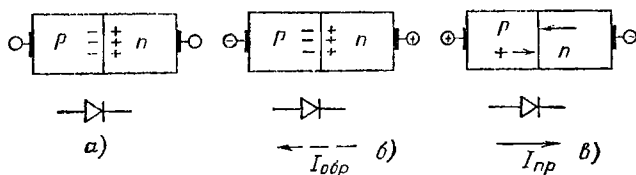


Рис. 29. Полупроводниковые диоды.

$a$  — без внешнего электрического поля;  $б$  — с внешним полем обратной полярности;  $в$  — с внешним полем прямой полярности.

Между полупроводниками диода при отсутствии внешнего поля образуется потенциальный барьер в виде двойного электрического слоя, препятствующий проникновению зарядов через  $p$ - $n$ -переход (рис. 29,  $a$ ).

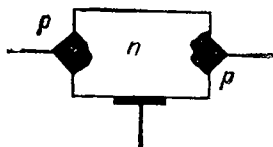


Рис. 30. Структурная схема плоскостного триода типа  $p$ - $n$ - $p$ .

При включении диода, как показано на рис. 29,  $б$ , в цепи возникает незначительный обратный ток, обусловленный только движением неосновных носителей зарядов.

С изменением полярности на электродах электрическое поле двойного электрического слоя уменьшается (рис. 29,  $в$ ). При этом сопротивление  $p$ - $n$ -перехода также уменьшается, и по диоду проходит прямой ток, который определяется параметрами внешней цепи.

На основе полупроводников с дырочной и электронной проводимостью разработаны управляемые полупроводниковые приборы — транзисторы. Последние представляют собой триоды с проводимостями типа  $p$ - $n$ - $p$  или  $n$ - $p$ - $n$ .

Конструктивно транзисторы разделяются на точечные и плоскостные. Наибольшее распространение получили последние.

Структурная схема плоскостного триода типа  $p-n-p$  показана на рис. 30. Кристалл германий, имеющий проводимость типа  $n$ , сплавляется с двумя кусочками металлического индия. В местах сплавления образуются области с проводимостью типа  $p$ .

Принципиальная схема плоскостного триода с проводимостью типа  $p-n-p$  приведена на рис. 31.

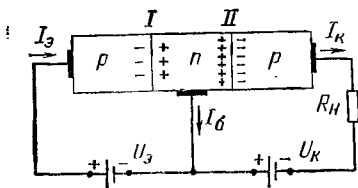


Рис. 31. Принципиальная схема включения полупроводникового триода.

$I$  — переход эмиттер — база;  $II$  — переход коллектор — база;  $R_H$  — сопротивление нагрузки.

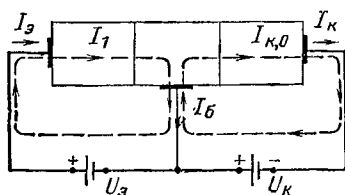


Рис. 32. Образование тока базы плоскостного триода.

Левая область триода носит название эмиттера, правая — коллектора и средняя — основания, или базы.

Между эмиттером и базой образуется эмиттерный, а между коллектором и базой — коллекторный переходы. Первый из них находится под прямым напряжением  $U_э$ , второй — под обратным  $U_к$ . Потенциальный барьер первого перехода ослабляется, а второго усиливается.

Эмиттер и базу можно рассматривать как диод в режиме прямого тока с низкоомным коллекторным переходом, а коллектор и базу — как диод в режиме обратного тока с высокоомным коллекторным переходом.

Дырки эмиттера (рис. 31) под действием электрического поля переходят в область  $n$ . При этом возникает ток эмиттера  $I_э$ . Незначительная часть дырок рекомбинирует с электронами базы, что равносильно прохождению тока  $I_1$  по контуру эмиттер — база — источник питания — эмиттер (рис. 32). Основное же их количество (90—99%) преодолевает сопротивление второго перехода, обуславливая прохождение тока коллектора  $I_к$ .

Электроны проводимости коллектора, втягиваясь под влиянием внешнего поля в область базы, вызывают появление обратного тока коллекторного перехода  $I_{к,о}$ . Этот ток весьма мал, так как электроны проводимости в области коллектора не являются основными носителями зарядов. Для плоскостного триода справедливо неравенство  $I_1 > I_{к,о}$ , поэтому ток базы имеет направление, показанное на рис. 31, т. е. он вытекает из базы.

Ток коллектора (рис. 31) определяется из соотношения

$$I_k = I_{к,о} + \alpha I_э,$$

где  $\alpha$  — коэффициент передачи тока эмиттера в область коллектора.

В идеальном транзисторе все дырки эмиттера достигают коллектора ( $\alpha=1$ ). В действительности происходит

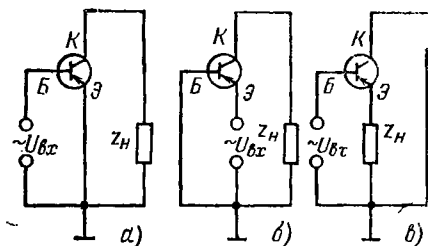


Рис. 33. Схемы включения транзисторов. а — с общим эмиттером Э; б — с общей базой Б; в — с общим коллектором К.

рекомбинация части дырок с электронами базы ( $\alpha=0,9 \div 0,99$ ).

Ток эмиттера, определяющий ток коллектора, зависит от потенциала базы относительно эмиттера. Поэтому база называется управляющим электродом.

Принцип действия транзистора типа *n-p-n* аналогичен. Отличие состоит только в том, что основными носителями зарядов являются не дырки, а электроны.

Включение транзистора производят по одной из схем: с общим эмиттером, с общей базой или с общим коллектором. В первой из них источник сигнала включается между базой и эмиттером, а сопротивление нагрузки — между коллектором и эмиттером (рис. 33, а). Во второй источник сигнала включается в цепь эмиттер — база, а нагрузка — в цепь коллектор — база (рис. 33, б).

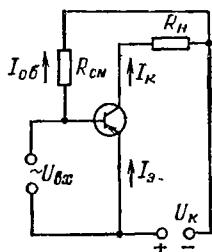


Рис. 34. Схема включения транзистора с подачей смещения на базу.  $R_{см}$  — сопротивление смещения;  $R_H$  — сопротивление нагрузки.

В третьей схеме источник сигнала вводится в цепь база — коллектор, а нагрузка — в цепь эмиттер — коллектор (рис. 33, в). Через  $\sim U_{вх}$  на схемах рис. 33 обозначено напряжение источника сигнала. Источники постоянного напряжения не показаны.

На принципиальных схемах триодов (рис. 31, 32) изображены два источника питания. В действительности цепи транзистора присоединяются к одному источнику постоянного напряжения. При этом возникает необходимость подачи отрицательного смещения порядка 0,05—3 В на базу транзистора типа *p-n-p* относительно эмиттера или положительного смещения — на базу транзистора типа *n-p-n*.

Возможны различные способы подачи смещения на базу. Один из них показан на рис. 34. Как видно, в цепь базы транзистора типа *p-n-p*, включенного по схеме с общим эмиттером, введено сопротивление смещения  $R_{см}$ , которое может быть вычислено из соотношения

$$U_K = U_{б,э} + I_{об} R_{см},$$

где  $U_K$  — напряжение источника питания;  $U_{б,э}$  — напряжение смещения базы;  $I_{об}$  — постоянная составляющая тока базы.

Для полупроводникового триода возможны режим регулируемого сопротивления (усилителя мощности) и ключевой режим.

Усиление мощности основывается на том, что дырки эмиттера под воздействием внешнего поля беспрепятственно проходят через высокоомный коллекторный переход. При этом небольшие изменения тока базы вызывают значительные колебания напряжения и мощности нагрузки.

Существенным недостатком триода в режиме усиления мощности является зависимость его параметров от температуры. Влияние последней может быть ограничено введением отрицательных обратных связей.

Ключевой режим работы триода осуществляется по принципу Да или Нет (1 или 0). Это означает, что прибор находится в состоянии насыщения или отсечки. Насыщение достигается подачей на базу отрицательного по отношению к эмиттеру потенциала. Отсечка достигается изменением полярности управляющего электрода (базы).

Ключевой режим соответствует минимальной мощности, рассеиваемой в триоде. Если прибор открыт (насы-

щен), то падение напряжения на нем ничтожно, если закрыт (отсечка), то ток, проходящий по нему, очень мал. Другое преимущество ключевого режима состоит в том, что отпадает необходимость в мерах по стабилизации параметров триода. Положение соответствующих этому режиму двух рабочих точек от температуры практически не зависит.

Новый полупроводниковый прибор — тиристор представляет собой управляемый вентиль с четырехслойной кремниевой структурой проводимостей типа  $p-n-p-n$

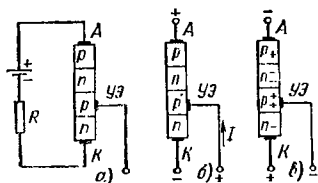


Рис. 35. Управляемый вентиль с четырехслойной структурой — тиристор.

$a$  — под прямым напряжением без управляющего сигнала;  $b$  — под прямым напряжением с управляющим сигналом;  $в$  — под обратным напряжением.

(рис. 35). По принципу действия тиристор аналогичен тиратрону. Как полупроводниковый прибор он отличается малой массой, мгновенной готовностью к работе, механической прочностью.

Падение напряжения в проводящем состоянии на тиристоре меньше, чем на ионном вентиле (0,85—1,5 В вместо 10—20 В), время восстановления управляемости по окончании

прохождения тока также меньше (8—35 мкс вместо 200—500 мкс).

Ток управления тиристора меньше, чем у транзистора (около 50 мА вместо тока базы мощного транзистора до 500 мА), а коэффициент усиления по мощности значительно больше. Прибор допускает температуру нагрева до 100—150°C. В настоящее время шкала его номинальных токов охватывает диапазон от 2 до 200 А при напряжениях до 600 В. Ведутся работы по созданию тиристоров на токи до 1000 А и на напряжения до 1000 В [13].

Тиристор, находящийся под прямым напряжением, может быть открыт или заперт. Для перевода вентиль в состояние высокой проводимости без управляющего сигнала необходимо повысить напряжение до напряжения включения. Однако такой способ отпирания тиристора является нерациональным и на практике не используется.

Включение тиристора производится импульсами управляющего тока. На управляющий электрод подает-

ся положительный по отношению к катоду потенциал. После того, как включение произошло, ток управляющего электрода не оказывает влияния на ток в цепи анода. Последний определяется только напряжением питания и сопротивлением нагрузки. Потеря управляемости после включения создает проблему запираания вентиля. В схемах с питанием от источника постоянного тока эта задача решается посредством разряда коммутирующих конденсаторов (*принудительная коммутация*).

Запирание вентиля возможно также воздействием на него обратным напряжением, что и используется в схемах с питанием от источника переменного тока (*естественная коммутация*).

Очередное включение тиристора производится подачей управляющего импульса тока (10—50 мА) при напряжении цепи управляющий электрод — катод (1—1,5 В). Тиристор, как и полупроводниковый выпрямитель, периодически оказывается под воздействием прямого и обратного напряжения. Последнее не должно превышать  $U_{обр.доп.}$ . В противном случае возникает необратимый пробой, и прибор к эксплуатации становится непригодным.

По условию быстрого действия на вход тиристора подаются импульсы тока (сигналы) прямоугольной формы. Источниками сигналов являются задающие генераторы.

В качестве задающих генераторов широко используются мультивибраторы, что объясняется их простотой и возможностью непосредственного получения управляющих импульсов с требуемой крутизной фронта. На рис. 36 приведена схема магнитного мультивибратора Ройера.

Мультивибратор *ММ* состоит из двух транзисторов *T1*, *T2*, включенных по схеме с общим эмиттером, и трансформатора *Tr2* с пятью обмотками. Четыре обмотки являются первичными и одна вторичной. Возможно также применение нескольких вторичных об-

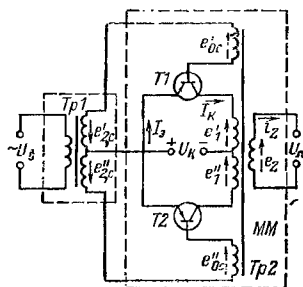


Рис. 36. Схема магнитного мультивибратора.

моток. Питание мультивибратора осуществляется от источника постоянного напряжения  $U_k$ . В качестве источников сигналов используются вторичные обмотки трансформатора  $Tr1$ .

Рассмотрим принцип действия мультивибратора. Пусть э. д. с. источников сигналов  $e'_{2,c}$  и  $e''_{2,c}$  направлены, как показано на рис. 36, сверху вниз, причем потенциал базы транзистора  $T1$  по отношению к потенциалу эмиттера становится отрицательным. Транзистор  $T1$  отпирается. В то же время транзистор  $T2$  находится в режиме отсечки, так как на базу этого триода подается положительный по отношению к эмиттеру потенциал.

В контуре: плюс источника питания — эмиттер транзистора  $T1$  — коллектор — первичная обмотка трансформатора  $Tr2$  — минус источника питания, возникает ток, создающий в сердечнике магнитный поток. С изменением магнитного потока в обмотках трансформатора  $Tr2$  наводятся э. д. с., обозначенные на рис. 36 пунктирными стрелками.

Под влиянием э. д. с.  $e_2$  вторичной обмотки мультивибратора по сопротивлению нагрузки, не показанному на рис. 36, потечет ток  $i_2$ .

Как видно, э. д. с. первичных обмоток мультивибратора, включенных в цепи баз  $e'_{oc}$  и  $e''_{oc}$ , имеют направление, при котором на базе транзистора  $T1$  поддерживается отрицательный потенциал, а на базе транзистора  $T2$  — положительный. Таким образом, эти обмотки выполняют функцию положительной обратной связи.

С изменением знака э. д. с. источников сигналов, а именно, когда потенциал базы транзистора  $T2$  по отношению к потенциалу эмиттера станет отрицательным, а потенциал базы транзистора  $T1$  по отношению к потенциалу эмиттера — положительным, произойдет переключение триодов. Во втором полупериоде входного напряжения мультивибратора открывается транзистор  $T2$ , а транзистор  $T1$  запирается. В следующем полупериоде триоды поменяются ролями и т. д. Таким образом, триоды мультивибратора и обмотки, включенные в коллекторные цепи триодов, работают по полупериодам. Частота переключения триодов определяется частотой входного напряжения.

На выходе мультивибратора формируется переменное напряжение прямоугольной формы. Таким образом, мультивибратор преобразует синусоидальное напряже-

ние в прямоугольное и, кроме того, усиливает мощность управляющих сигналов.

Возможность получения кривой выходного напряжения с достаточно крутым фронтом обеспечивается применением ферритового сердечника с прямоугольной формой петли гистерезиса.

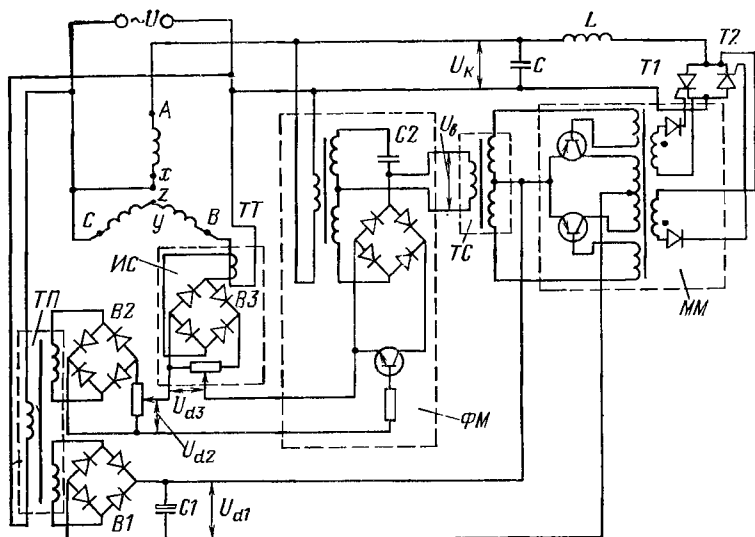


Рис. 37. Схема включения конденсаторного двигателя с регулятором эквивалентной емкости на полупроводниковых приборах.

ТТ — трансформатор тока; ИС — источник сигнала; ФМ — фазовращательный мост; ТС — трансформатор согласования; ММ — магнитный мультивибратор; Т1, Т2 — тиристоры; С — емкость конденсаторной фазы; L — индуктивность линейного дросселя; ТП — трансформатор питания (через выпрямитель) мультивибратора и системы регулирования эквивалентной емкости конденсаторной фазы.

Магнитный поток сердечника при переключении триодов изменяется от одного предельного значения до другого за время от 0,3 до 12 мкс, т. е. почти мгновенно.

**Схема конденсаторного двигателя с регулятором эквивалентной емкости на полупроводниковых приборах.** Схема конденсаторного двигателя, основанная на использовании полупроводниковых приборов, показана на рис. 37.

В силовую часть схемы входят статорные обмотки исходного трехфазного двигателя, конденсатор, линейный дроссель и тиристоры. Последние соединены между

собой встречно-параллельно, а последовательная цепь, образованная обмоткой дросселя и тиристорами, включена параллельно конденсатору.

Емкость конденсатора не изменяется, т. е. выполняется условие

$$C = \text{const.}$$

Фаза  $A - x$  является конденсаторной.

Две другие статорные обмотки (фазы  $B - y$  и  $C - z$ ), соединенные последовательно, образуют главную фазу, включаемую на напряжение  $U$  сети.

Баланс напряжений, действующих в цепи конденсаторной фазы, описывается уравнением (28а).

Ток конденсаторной фазы равен геометрической сумме токов конденсатора и дросселя:

$$I_A = I_{k,\phi} = I_k + I_L,$$

где  $I_k$  — ток конденсатора;  $I_L$  — ток дросселя.

Если пренебречь потерями в конденсаторе и дросселе как несущественными, то он будет определяться арифметической разностью этих токов:

$$I_A = I_k - I_L,$$

причем по условию сдвига фаз между токами главной и конденсаторной фаз на угол, равный или близкий к  $90^\circ$  (см. векторную диаграмму рис. 22), должно быть выполнено неравенство

$$I_k > I_L.$$

Ток конденсатора постоянной емкости остается практически постоянным:

$$I_k \approx \text{const.}$$

Следовательно, необходимого изменения тока конденсаторной фазы с изменением нагрузки двигателя можно достигнуть путем соответствующего регулирования тока дросселя. Возникающее при этом изменение разности токов ( $I_k - I_L$ ) аналогично регулированию эквивалентной емкости конденсаторной фазы.

Очевидно, что с возрастанием нагрузки ток дросселя должен уменьшаться и, наоборот, увеличиваться, когда нагрузка уменьшается. Тогда по характеру изменения тока конденсаторная фаза не будет отличаться от главной фазы.

Оптимальному режиму регулирования соответствует равенство токов

$$I_A = I_{k,\phi} = I_{r,\phi}$$

при любой произвольно взятой нагрузке.

Из изложенного вытекает, что по идее регулирования эквивалентной емкости конденсаторной фазы схемы, приведенные на рис. 26 и 37, аналогичны. Однако они принципиально отличаются друг от друга по способу воздействия на ток дросселя. Если в схеме на рис. 26 переменный ток дросселя насыщения зависит от режима подмагничивания сердечников, то в рассматриваемой схеме действующее значение тока дросселя является функцией угла сдвига фаз управляющих прямоугольных сигналов, подводимых к тиристорам, относительно напряжения  $U_K$  на конденсаторе.

Будем по-прежнему полагать, что потери в конденсаторе и дросселе отсутствуют. При этом допущении ток дросселя будет отставать от приложенного к нему напряжения по фазе  $90^\circ$ . Синусоидальные кривые напряжения на конденсаторе и тока дросселя показаны на рис. 38. По этим кривым, построенным в определенном масштабе, нетрудно определить значение напряжения  $u_K$  на конденсаторе или тока  $i_L$  дросселя для любого момента времени.

Обозначим угол сдвига фаз управляющих прямоугольных импульсов относительно напряжения на конденсаторе через  $\theta$  и рассмотрим зависимость тока дросселя от этого угла применительно к следующим случаям:

- а)  $\theta = 90^\circ$ ;
- б)  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ;
- в)  $\theta = 180^\circ = 0^\circ$ .

На вход тиристоров  $T1$  и  $T2$  поочередно подаются управляющие импульсы напряжения  $u_{y,1}$  и соответственно  $u_{y,2}$ . Ток дросселя, управляемый с помощью тиристоров, будет несинусоидальным. Но периодически

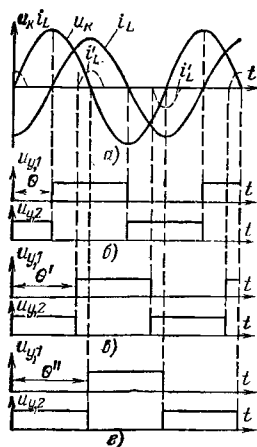


Рис. 38. Графики, поясняющие процесс регулирования тока дросселя с помощью тиристоров.

а — синусоидальные кривые изменения напряжения конденсатора и тока дросселя; б — зависимости прямоугольных управляющих импульсов напряжений, подаваемых на вход тиристоров при фазовом угле сдвига  $\theta = (\dot{U}_K; \dot{I}_L) = 90^\circ$ ; в — то же при  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ; г — то же при  $\theta = -\theta'' = 180^\circ$ .

изменяющаяся функция времени с несинусоидальной формой кривой, как известно из электротехники, может быть представлена в виде суммы составляющих синусоид, из которых определяющее значение имеет первая (основная) гармоника. Ее мы и будем иметь в виду при дальнейшем изложении.

В первом случае управляющие импульсы напряжения должны быть сдвинуты по фазе относительно напряжения  $u_k$  в сторону отставания на  $90^\circ$ , что иллюстрируется кривыми, приведенными на рис. 38, а, б.

Как видно, в момент прохождения напряжения  $u_k$  через положительный максимум на вход тиристора  $T1$  подается управляющий импульс напряжения  $u_{y,1}$ , и этот тиристор открывается. По обмотке дросселя проходит ток  $i_L$  в течение всего положительного полупериода.

Когда напряжение  $u_k$ , изменяясь, достигнет наибольшего отрицательного значения, на вход тиристора  $T2$  подается управляющий импульс напряжения  $u_{y,2}$ , и этот тиристор открывается. В тот же момент времени прекращается подача импульса напряжения  $u_{y,1}$ . Тиристор  $T1$ , оказавшись под воздействием обратного напряжения, запирается. По обмотке дросселя в течение всего отрицательного полупериода проходит ток  $i_L$ .

Затем, как только напряжение  $u_k$  вновь достигнет положительной амплитуды, откроется тиристор  $T1$ , тиристор  $T2$  заперется и т. д.

Таким образом, при сдвиге управляющих прямоугольных сигналов относительно напряжения  $u_k$  в сторону отставания на  $90^\circ$  по обмотке дросселя проходит ток в течение всего периода, а амплитуда тока дросселя достигает наибольшего значения.

Индуктивное сопротивление дросселя (по первой гармонике)

$$x_{L(1)} = \frac{U_k}{I_{L(1)}}$$

(где  $I_{L(1)}$  — действующее значение основной гармоники тока дросселя) имеет минимальное значение. Из сказанного вытекает, что углу сдвига фаз  $\theta = 90^\circ$  соответствует наименьшее значение тока конденсаторной фазы.

Во втором случае угол  $\theta$  может, например, принять значение  $\theta'$ , как показано на рис. 38, в.

В момент подачи управляющего импульса напряжения  $u_{y,1}$  на вход тиристора  $T1$  (см. рис. 37) этот тири-

стор отпирается и по обмотке дросселя начинает проходить ток  $i'_L$  в положительном направлении.

При прохождении напряжения  $u_K$  через нулевое значение ток  $i'_L$  достигает наибольшего значения и далее начинает уменьшаться.

Вследствие того, что управляющие сигналы, подаваемые на вход тиристоров, сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ , через полпериода напряжения  $u_K$  включится тиристор  $T2$  и по обмотке дросселя потечет ток  $i'_L$  в обратном (отрицательном) направлении. Затем еще через половину периода напряжения  $u_K$  включится тиристор  $T1$  и направление тока  $i'_L$  изменится на обратное и т. д.

Очевидно, что по мере увеличения угла  $\theta$  от  $90$  до  $180^\circ$  амплитуда первой гармоники тока дросселя будет все более уменьшаться, а ток конденсаторной фазы возрастать. Следовательно, с увеличением нагрузки на валу машины необходимо осуществлять увеличение угла  $\theta$  в пределах от  $90$  до  $180^\circ$ .

*Предельному случаю*, при котором угол  $\theta$  принимает значение  $\theta''=180^\circ$ , соответствует векторная диаграмма, показанная на рис. 38,г. Управляющий импульс напряжения  $u_{y,1}$  подается на вход тиристора  $T1$ , когда напряжение  $u_K$ , изменив свой знак, начинает увеличиваться в отрицательном направлении. Тиристор оказывается под воздействием обратного напряжения и не отпирается.

Через половину периода будет подан управляющий импульс напряжения  $u_{y,2}$  на вход тиристора  $T2$ . Этот тиристор также окажется под воздействием обратного напряжения и не откроется.

Условию  $\theta=\theta''=180^\circ$  соответствует равенство

$$I_A=I_K\phi=I_K,$$

так как цепь дросселя остается разомкнутой.

Итак, для ограничения тока дросселя с увеличением нагрузки двигателя необходимо увеличивать угол  $\theta$  от  $90^\circ$  до значения, соответствующего приложенной нагрузке.

Схема регулирования, обеспечивающая указанный характер изменения угла  $\theta$ , должна включать в себя следующие элементы:

1) фазовращательный мост ФМ для изменения фазы выходного синусоидального напряжения относительно напряжения  $U_K$ ;

2) магнитный мультивибратор *ММ*, преобразующий синусоидальное напряжение в прямоугольное (для управления тиристорами) и усиливающий мощность управляющих сигналов;

3) трансформатор согласования *ТС* параметров выходной цепи фазовращательного моста с параметрами входа мультивибратора;

4) измерительный элемент *ИЭ*, измеряющий ток главной фазы двигателя и осуществляющий воздействие на систему в нужном направлении для изменения тока дросселя в соответствии с изменением тока главной фазы;

5) устройство для обеспечения начального значения угла  $\theta$  (при минимальном значении тока главной фазы).

Фазовращательный мост (рис. 37 и 39) состоит из трансформатора, конденсатора с емкостью  $C_2 = \text{const}$ , выпрямителя и регулируемого активного сопротивления  $r_2 = \text{var}$ .

Две выходные обмотки трансформатора выполняют роль двух плечей моста. Два других плеча образуют конденсатор и активное сопротивление. Последнее реализуется в виде полупроводникового триода типа *n-p-n*, включенного в диагональ выпрямительного моста.

Рис. 39. Принципиальная схема фазовращательного моста.

$r_2$ ,  $x_{C2}$  — активное и реактивное (емкостное) сопротивления плечей моста.

Напряжение  $U_{\text{в}}$ , возникающее на выходных зажимах фазовращательного моста *ФМ*, подается на вход трансформатора согласования.

Рассмотрим принцип действия фазовращательного моста, полагая для упрощения, что нагрузка отсутствует, т. е. что мост работает в режиме холостого хода (рис. 39).

Напряжения вторичных обмоток фазовращательного моста равны и совпадают по фазе:

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}''_2.$$

Ток  $I_2$ , проходя по замкнутому контуру, образованному плечами моста, вызывает падения напряжения: на конденсаторе

$$\dot{U}_{C2} = I_2 x_{C2},$$

(где  $x_{c2}$  — сопротивление конденсатора  $\Phi M$ ) отстающее от тока по фазе на  $90^\circ$ ;

и на активном сопротивлении

$$\dot{U}_{a,2} = I_2 r_2,$$

совпадающее по фазе с током.

Баланс напряжений вторичной цепи трансформатора описывается уравнением

$$\dot{U}_2 = \dot{U}'_2 + \dot{U}''_2 = \dot{U}_{a,2} + \dot{U}_{c2},$$

т. е. напряжение  $\dot{U}_2$  на выходе трансформатора всегда равно геометрической сумме падений напряжений на активном сопротивлении  $r_2$  и на сопротивлении  $x_{c2}$  конденсатора. Эти падения напряжений связаны с напряжением  $\dot{U}_B$  соотношениями:

$$\dot{U}_{a,2} = \dot{U}'_2 + \dot{U}_B;$$

$$\dot{U}_{c2} = \dot{U}''_2 - \dot{U}_B,$$

из которых нетрудно определить напряжение на выходе моста по величине и фазе.

Если соблюдается равенство сопротивлений

$$r_2 = x_{c2},$$

то

$$U_{a,2} = U_{c2}$$

и векторная диаграмма фазовращательного моста принимает вид, показанный на рис. 40,а. При равенстве сопротивлений вектор напряжения на выходе фазовращательного моста сдвинут относительно вектора напряжения  $U_K$  на конденсаторе по фазе на  $90^\circ$  в сторону отставания.

С увеличением активного сопротивления падения напряжений на сопротивлениях фазовращательного моста перераспределяются и вектор напряжения на выходе моста поворачивается в направлении часовой стрелки. Так, соотношению сопротивлений

$$r_2 = 2x_{c2}$$

отвечает векторная диаграмма, приведенная на рис. 40,б.

Угол, образованный векторами  $\dot{U}_K$  и  $\dot{U}_B$ , превышает  $90^\circ$ , а при соотношении

$$r_2 = 10x_{c2}$$

он приближается к  $180^\circ$  (рис. 40,в).

Из изложенного вытекает, что увеличение активного сопротивления фазовращательного моста от  $r_2 = x_{c2}$  до некоторого значения  $r_2 \gg x_{c2}$  вызывает увеличение угла сдвига фаз от  $(\vec{U}_K; \vec{U}_B) = 90^\circ$  до  $(\vec{U}_K; \vec{U}_B) \approx 180^\circ$ . При-

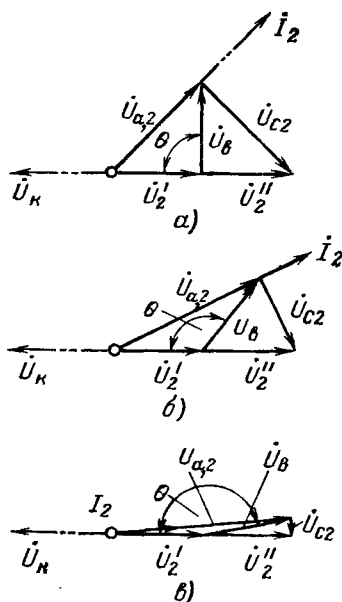


Рис. 40. Векторные диаграммы фазовращательного моста.

а — при  $r_2 = x_{c2}$  ( $\theta = 90^\circ$ ); б — при  $r_2 = 2x_{c2}$  ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ); в — при  $r_2 = 10x_{c2}$  ( $\theta \approx 180^\circ$ ).

Следовательно, при минимальной нагрузке (режим холостого хода двигателя) необходимо создать начальный ток базы, удовлетворяющий равенству сопротивлений  $r_2 = x_{c2}$ . С появлением нагрузки ток базы транзистора должен уменьшаться тем сильнее, чем больше нагрузка.

Для создания начального тока базы триода служит трансформатор ТП, одна из вторичных обмоток которого через выпрямитель В2 присоединена к потенциометру. Напряжение на выходе потенциометра не зависит от режима работы двигателя и при данном фиксированном положении подвижного контакта остается

близженно можно считать (пренебрегая сдвигом фаз в согласующем трансформаторе и магнитном мультивибраторе), что и прямоугольное напряжение на выходе мультивибратора будет таким же образом изменяться по фазе относительно напряжения  $\vec{U}_K$  с изменением активного сопротивления ФМ, т. е. от  $\theta = 90^\circ$  до  $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ .

Итак, уменьшение тока дросселя с ростом тока главной фазы достигается увеличением фазового угла сдвига  $\theta$  путем увеличения активного сопротивления  $r_2$  фазовращательного моста в пределах от  $r_2 = x_{c2}$  до  $r_2 \approx (20 \div 30)x_{c2}$ .

Сопротивление  $r_2$  — это сопротивление коллекторной цепи триода, являющееся функцией тока базы. Оно увеличивается с уменьшением тока базы.

постоянным:

$$U_{d,2} = \text{const.}$$

Напряжение на выходе другого потенциометра, включенного через выпрямитель  $B3$  во вторичную цепь трансформатора тока, являющееся напряжением обратной связи, пропорционально току главной фазы:

$$U_{d,3} = kI_{г,ф},$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Напряжения  $U_{d,2}$  и  $U_{d,3}$  действуют в цепи база — эмиттер триода, причем относительно друг друга они направлены встречно. Их алгебраическая сумма определяет напряжение, подведенное к этой цепи:

$$U_{б,з} = U_{d,2} - kI_{г,ф}.$$

При минимальном токе главной фазы ток базы транзистора становится наибольшим, что видно из соотношения

$$U_{б,з, \max} = U_{d,2} - kI_{г,ф, \min}.$$

При этом в цепи эмиттер — коллектор триода происходит увеличенный ток, при котором обеспечивается равенство сопротивлений фазовращательного моста ( $r_2 = x_{C2}$ ), соответствующее фазовому углу сдвига  $\theta = 90^\circ$ .

Увеличение нагрузки (тока главной фазы) приводит к уменьшению напряжения  $U_{б,з}$  и соответственно тока базы триода. Сопротивление цепи коллектор — эмиттер увеличивается, вызывая увеличение фазового угла сдвига  $\theta$ . Максимумы импульсов тока дросселя и амплитуды первой гармоники тока дросселя ограничиваются. В результате происходит возрастание тока конденсаторной фазы.

Максимальному току главной фазы удовлетворяют соотношения:

$$U_{б,з, \min} = U_{d,2} - kI_{г,ф, \max};$$

$$r_2 \gg x_{C2};$$

$$\theta \approx 180^\circ,$$

соответствующие току конденсаторной фазы:

$$I_A = I_{к,ф} = I_{к.}$$

Питание магнитного мультивибратора осуществляется от выпрямителя  $B1$ , включенного в цепь одной из вторичных обмоток трансформатора  $ТП$ . Конденсатор с емкостью  $C1$ , находящийся под напряжением  $U_{d,1}$ , служит фильтром высших гармоник.

## 16. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ КОНДЕНСАТОРОВ

Использование конденсаторов в силовых электрических цепях, в частности в схемах включения конденсаторного двигателя, связано с необходимостью проведения обязательных мер, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала.

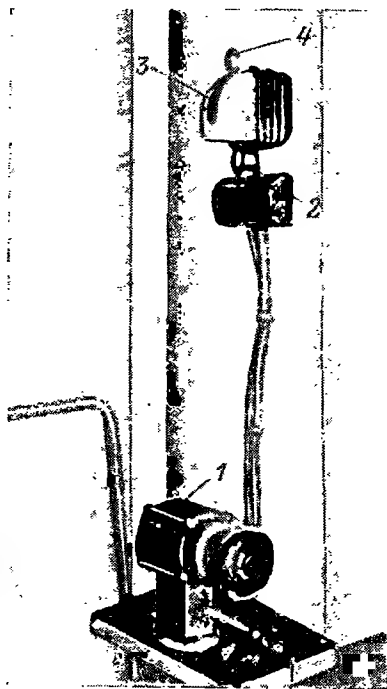


Рис. 41. Электроточилка с конденсаторным двигателем.

1 — двигатель; 2 — кожух из листовой стали с конденсаторами; 3 — рукоятка в положении пуск (включена пусковая емкость); 4 — рукоятка в положении работа (включена только рабочая емкость).

Основной мерой обеспечения безопасности обслуживания является устройство ограждений, исключающих возможность случайного прикосновения к открытым токоведущим частям, находящимся под напряжением. Желательно иметь сетчатые ограждения. При отсутствии металлической сетки ограждения могут быть сделаны в виде кожуха из листовой стали (рис. 41).

Батарею конденсаторов необходимо надежно закрепить, чтобы предупредить смещение ее от возможных вибраций и сотрясений. Расположение батареи и устройство ограждений должны обеспечить удобный доступ к конденсаторам.

Замена неисправных плавких вставок предохранителей производится только при замкнутом рубильнике в цепи отключаемой емкости. Каждый раз после выключения двигателя следует замыкать цепь с отключаемой емкостью, тем самым подготавливая схему к очередному пуску.

Необходимо иметь в виду, что конденсатор с исправной изоляцией после отключения сохраняет напряжение на выводах в течение длительного времени. В наиболее неблагоприятном случае оно может достигать амплитуды напряжения переменного тока.

Опасность поражения электрическим током при прикосновении к заряженному конденсатору тем больше, чем больше его емкость и выше напряжение.

При производстве ремонтных работ и испытаниях после каждого отключения конденсатора производится его разряд. В качестве разрядного сопротивления проще всего использовать несколько электрических ламп накаливания, соединенных последовательно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменко А. И. Однофазные конденсаторные двигатели. Киев: Изд. АН УССР, 1960.
2. Булаев Н. М. Питание однофазным током трехфазного асинхронного двигателя с конденсатором. — Электричество, 1937, № 12.
3. Меркин Г. Б. Конденсаторные электродвигатели для промышленности и транспорта. М.: Энергия, 1966.
4. Некрасов О. А. Рудничный конденсаторный электровоз КЭ-2. М.: Углетехиздат, 1952.
5. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. II. Асинхронные и синхронные машины. М.: Госэнергоиздат, 1963.
6. Рение В. Т. Электрические конденсаторы. М.: Энергия, 1968.
7. Розенфельд В. Е., Крайцберг М. И., Тихменев Б. Н. Рудничный электровоз переменного тока с конденсаторными двигателями. — Электричество, 1949, № 7.
8. Сергеев П. С. Электрические машины. М.: Госэнергоиздат, 1962.
9. А. с. 107711 (СССР). Бесконтактное устройство для автоматического управления однофазным асинхронным двигателем/ Торопцев Н. Д. — Оpubл. в Бюл. изобрет. и товарных знаков, 1957, № 7.
10. А. с. 110660 (СССР). Электровоз для монорельсовых подвесных дорог/ Торопцев Н. Д., Золотов С. П., Григорьев-Ершов В. А. — Оpubл. в Бюл. изобрет. и товарных знаков, 1957, № 12.
11. Торопцев Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. М.: Энергия, 1970.
12. Стульников В. И. Тиристоры в электроустановках. Киев: Техніка, 1967.
13. Электротехнический справочник. Т. 1/ Под общ. ред. П. Г. Грудинского и др. Изд. 5-е. М.: Энергия, 1974.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие                                                                                                | 3  |
| 1. Асинхронный двигатель трехфазного тока. Основные<br>технические данные                                  | 4  |
| 2. Работа асинхронного двигателя с тремя статорными об-<br>мотками от сети однофазного тока. Способы пуска | 10 |
| 3. Конденсаторный двигатель                                                                                | 15 |
| 4. Конденсаторы                                                                                            | 18 |
| 5. Электрические схемы конденсаторного двигателя                                                           | 20 |
| 6. Определение рабочей и пусковой емкости                                                                  | 23 |
| 7. Напряжение на конденсаторе                                                                              | 26 |
| 8. Выбор схемы включения                                                                                   | 27 |
| 9. Графическое изображение синусоидальных величин                                                          | 33 |
| 10. Графики зависимостей токов и напряжений конденса-<br>торного двигателя от нагрузки                     | 39 |
| 11. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя                                                          | 43 |
| 12. Расчетное определение рабочей емкости                                                                  | 50 |
| 13. Работа конденсаторного двигателя при условиях, отличаю-<br>щихся от номинальных                        | 53 |
| 14. Улучшение эксплуатационных свойств конденсаторного<br>двигателя                                        | 55 |
| 15. Применение полупроводниковых приборов в устройствах<br>управления конденсаторным двигателем            | 61 |
| 16. Техника безопасности при обслуживании конденсаторов                                                    | 78 |
| Список литературы                                                                                          | 89 |

**15 к.**